

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Факультет інформатики та обчислювальної техніки
Кафедра автоматики та управління в технічних системах**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Олександр РОЛІК

« ____ » _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Комп'ютеризовані системи управління»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
на тему: «Цифрова система керування промисловим роботом»

Виконав:

студент IV курсу, групи ІА-62

Пельцер Роман Олександрович

Керівник:

Доцент кафедри АУТС, к.т.н., доцент

Репнікова Наталія Борисівна

Рецензент:

Доцент кафедри АСОіУ, к.т.н., доцент

Жданова Олена Григорівна

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет інформатики та обчислювальної техніки
Кафедра автоматики та управління в технічних системах

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютеризовані системи управління»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Олександр РОЛІК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Пельцеру Роману Олександровичу

1. Тема проєкту «Цифрова система керування промисловим роботом», керівник проєкту Репнікова Наталія Борисівна к.т.н, доцент, затверджені наказом по університету від «07» травня 2020р. №1081-с
2. Термін подання студентом проєкту 09.06.2020
3. Вихідні дані до проєкту: промисловий робот UR10, контролер UR10 з регулятором, перерегулювання 0%, помилка 0%, час перехідного процесу 2,901 секунди.
4. Зміст пояснювальної записки: Огляд існуючих рішень, вибір технічної системи, розроблення схеми електричної структурної, розроблення схеми електричної функціональної, синтез регуляторів, розроблення програми для регулятора.
5. Перелік графічного матеріалу: схема електрична структурна, схема електрична функціональна, схема часових характеристик, схема загального вигляду рухомих частин робота.
6. Дата видачі завдання 30.04.2020.

Календарний план

№	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Аналіз предметної області та огляд існуючих рішень	04.05.2020	
2	Опис цифрової системи керування промисловим роботом	11.05.2020	
3	Розробка структурної та функціональної схеми цифрової системи керування промисловим роботом	14.05.2020	
4	Розробка математичної моделі цифрової системи керування промисловим роботом	19.05.2020	
5	Аналіз стійкості та якості системи	22.05.2020	
6	Розробка регулятора	25.05.2020	
7	Реалізація регулятора	28.05.2020	
8	Оформлення проєкту	03.06.2020	
9	Подання готового проєкту	09.06.2020	

Студент

Роман ПЕЛЬЦЕР

Керівник

Наталія РЕПНІКОВА

АНОТАЦІЯ

Пельцер Р. О. Цифрова система керування промисловим роботом. КПП ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2020.

Проект містить 70 с. тексту, 37 рисунки, 1 таблицю, 20 літературних джерел та 4 графічні матеріали.

Ключові слова: цифрова система керування промисловим роботом, промисловий робот, маніпулятор, регулятор.

Об'єктом дослідження є промисловий робот.

Предметом дослідження є цифрова система керування промисловим роботом.

У дипломному проєкті розроблено цифрову систему керування промисловим роботом, яка забезпечує підвищення ефективності свердління отворів за допомогою промислового маніпулятора. В проєкті розроблені структурна та функціональна схеми. Розроблена математична модель керування кутами повороту шарнірних рухомих частин маніпулятора. Синтезовано цифровий регулятор, який забезпечує скорочення регулювання до 2,901 секунди. Цифровий регулятор реалізовано за методом безпосередньої декомпозиції. Зроблена програма цифрової системи керування промисловим роботом з регулятором.

Отримані результати можна використовувати для роботів типу UR10 чи для автоматизації подібних об'єктів.

ANNOTATION

Peltser R.O. Industrial robot control digital system. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic institute, Kyiv, 2020.

The project contains 70 p. of text, 37 images, 1 table, 20 references and 4 drawings.

Keywords: industrial robot control digital system, industrial robot, manipulator, regulator.

The object of development is industrial robot.

The purpose of the project is industrial robot control digital system.

In the diploma project, a digital control system for an industrial robot was developed, which provides an increase in the efficiency of drilling holes using an industrial manipulator. The project developed a structural and functional diagram. A mathematical model for controlling the rotation angles of the articulated moving parts of the manipulator is developed. A digital controller is synthesized, which provides a reduction in regulation to 2.901 seconds. The digital controller is implemented by direct decomposition method. a program of a digital control system for an industrial robot with a regulator.

The results can be used for robots of the UR10 type or for automation of similar objects.

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Цифрова система керування
промисловим роботом»**

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	4
ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ....	7
1.1 Загальні відомості	7
1.2 Огляд існуючих рішень	9
1.2.1 Декартовий промисловий робот CARTESIAN BA05.....	9
1.2.2 Шарнірний робот Universal UR10	11
1.2.3 Промисловий робот SCARA TH1050.....	12
1.2.4 Дельта-робот SRBD1600	13
1.3 Технічні характеристики обраного типу промислового робота	14
2 ОПИС ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯМ ПРОМИСЛОВИМ РОБОТОМ.....	16
2.1 Опис керування промисловим роботом UR10	16
2.2 Опис структурної схеми цифрової системи керування промисловим роботом.....	17
2.3 Опис функціональної схеми цифрової системи керування промисловим роботом	19
3 РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ	21
3.1 Визначення еквівалентних параметрів для ланцюга якоря двигуна постійного струму	21
3.2 Перетворення Лапласа.....	24

					IA62.210БАК.005 ПЗ			
Зм.	Аркуш	№ докум.	Підп.	Дата	Цифрова система керування промисловим роботом. Пояснювальна записка	Літ.	Аркуш	Аркушів
Розроб.	Пельцер						2	70
Перевір.	Репнікова					«КПІ ім. І. Сікорського» ФІОТ група ІА-62		
Н. контр.								
Затв.								

3.3 Z-перетворення.....	26
3.4 Z-перетворення за допомогою додатка Matlab	32
4 АНАЛІЗ ЯКОСТІ ТА СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ.....	35
4.1 Аналіз стійкості цифрової системи за допомогою загального алгоритму	35
4.2 Аналіз стійкості цифрової системи за а допомогою критерію Гурвіца	40
4.3 Аналіз стійкості цифрової системи за допомогою критерію Найквіста.....	42
4.4 Аналіз якості цифрової системи	44
5 СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОМИСЛОВИМ РОБОТОМ	47
5.1 Синтез цифрового ПД – регулятора.....	47
5.2 Синтез цифрового ПД – регулятора у середовищі Matlab.....	55
6 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА.....	61
6.1 Безпосередня декомпозиція регулятора	61
6.2 Розробка ПД-регулятора мовою програмування ST	63
ВИСНОВКИ.....	66
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	67
ДОДАТОК А.....	69

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПД-регулятор – регулятор з пропорційною та диференціальною складовими.

$W_{бч}$ – передавальна функція безперервної частини.

$W_{пбч}$ – передавальна функція приведеної безперервної частини.

$W_{пд}$ – передавальна функція ПД-регулятора.

$W_з$ – замкнута передавальна функція.

$K_{гр}$ – граничний коефіцієнт.

K_p – коефіцієнт для пропорційної ланки.

K_d – коефіцієнт для диференційної ланки.

ST – мова програмування Structured Text.

					IA62.2105AK.005 ПЗ	4
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

На даний момент майже всі промислові підприємства використовують промислових роботів у різних галузях робіт. В основному ці промислові роботи складаються з електромеханічних взаємопов'язаних між собою ланок, які приводяться до руху завдяки синхронно керуючими двигунами. Тому щоб досягти правильного керування для виконання певної роботи дані роботи обладнані спеціальними системами керування. Завдяки цим системам людина може взаємодіяти роботом для автоматизації технологічного процесу. Також є багато різноманітних насадок для промислових роботів для різного роду робіт.

Існує багато різних маніпуляторів і для ефективної роботи кожного потрібен унікальний регулятор для цифрової системи керування промисловим роботом. Значно ефективніше використовувати шарнірного промислового робота для свердління отворів у деталей під різними кутами.

Мета дипломного проекту забезпечення ефективності свердління отворів в деталі.

Дана система повинна ефективно керувати кутом нахилу промислового робота. Тобто кутом повороту шарніра промислового робота, якого обрали для проведення дослідів.

Вирішено наступні задачі для досягнення поставленої мети:

- розробка структурної та функціональної схеми цифрової системи керування промисловим роботом;
- розробка цифрової моделі об'єкта керування;
- аналіз на стійкість та якість цифрової системи;
- синтез цифрового ПД-регулятора;
- дослідження відповідного регулятора;
- програмування регулятора цифрової системи керування промисловим роботом.

Об'єктом дослідження є промисловий робот

					IA62.2105AK.005 ПЗ	5
Зм.	Лист	№ док.м.	Підпис	Дата		

Предметом дослідження є цифрова система керування промисловим роботом

У дипломному проекті були використані наступні методи:

- визначення еквівалентних параметрів для ланцюга якоря двигуна постійного струму за допомогою фізичних формул;
- перетворення Лапласа;
- метод Z-перетворення;
- метод невизначених коефіцієнтів;
- метод розв’язання кубічного рівняння;
- дослідження стійкості за трьома критеріями: загальним, Гурвіца та Найквіста;
- дослідження якості системи частотними характеристиками;
- синтез цифрового ПД-регулятора методом компенсації його нулями полюсів передавальної функції;
- синтез ПД-регулятора за допомогою додатка Matlab/Simulink;
- реалізація цифрового регулятора шляхом безпосередньої декомпозиції;
- реалізація цифрового регулятора мовою програмування ST.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

1.1 Загальні відомості

Сьогодні в різних галузях людської діяльності широко використовують промислових роботів. Вони дозволяють підвищити швидкість технологічних процесів, зменшити кількість робочих на небезпечних ділянках у виробництві, використовувати себе в агресивних середовищах.

Перші промислові роботи з'явилися у середині 1950-х роках у Сполучених Штатах Америки. Це були вантажно-розвантажувальні маніпулятори, виконуючи свою задачу за допомогою змінних перфокарт. Пізніше у Японії років через п'ять розробили маніпулятор з числовим програмним управлінням, а на початку 60-х років з'явилися перші маніпулятори для автоматизації складальних і інших робіт з програмним управлінням. Поява в 1970-х роках мікропроцесорних систем управління і заміна спеціалізованих пристроїв управління на програмовані контролери дозволили знизити вартість роботів в три рази, зробивши рентабельним їх масове впровадження в промисловості. Цьому сприяли об'єктивні передумови розвитку промислового виробництва.

Ще були такі 2 популярні типи роботів: сферичні та циліндричні, дані представники яких розглянуті нижче.

Один з перших промислових роботів Kawasaki-Unimate 2000 – це сферичний робот, з полярної системою координат (рисунок 1.1).

Цей промисловий робот випущений в 1969 році. Даний робот рухається завдяки центрального поворотного валу, та має спеціальну руку з двома ступенями гнучкості, яка для досягнення великого радіусу дії здатна подовжуватися.

Такий тип промислових роботів широко використовувався на початку промислової робототехніки, на сьогодні даний тип роботів замінили шарнірні роботи.

Ще не так давно найпопулярнішими промисловими роботами, які використовувались протягом 50 років, були циліндричні роботи.

					IA62.2105AK.005 ПЗ	7
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

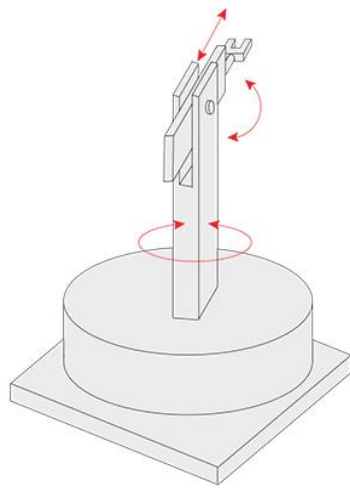


Рисунок 1.1 – Сферичний промисловий робот Kawasaki-Unimate 2000 [12]

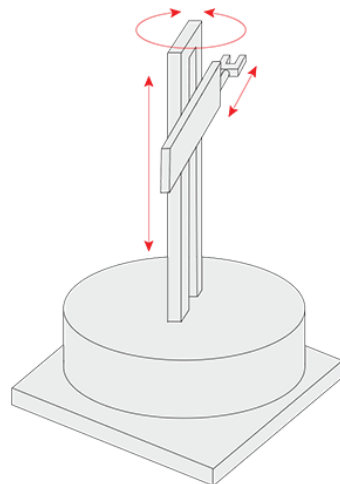


Рисунок 1.2 – Циліндричний промисловий робот Kawasaki TL420 [12]

Промисловий робот циліндричний промисловий Kawasaki TL420 (рисунок 1.2), який використовувався для роботи з рідкокристалічною скляною підкладкою.

Цей промисловий робот схожий на робота з декартовою системою координат, але рух виконується строго по вертикальній без обертів. Зазвичай для переміщень рідкокристалічних панелей моніторів [12].

Насьогодні промислові роботи мають різні концептуальні схеми маніпуляторів. Швидко розвиваються технологічні роботи, що виконують такі

операції, як нанесення забарвлення, високошвидкісне різання, зварювання, з'єднування, згинання і таке подібне.

Промислові роботи як правило мають такі можливості: маніпулятор, який програмується, призначений для здійснення певного, заздалегідь визначеного процесу виробництва з метою виконання різних робіт. Важливим компонентом промислового роботу це – сам маніпулятор, такий пристрій для виконання рухових функцій, аналогічних функціям руки людини для виконання дій у просторі, обладнане спеціальними робочими органами.

За своєю структурою промислові роботи складаються з багатьох ланок, які мають механічні зв'язки. Більшість існуючих в даний час промислових роботів використовують електричні двигуни для виконання переміщень. Для управління робочим органом можуть використовуватися пневматичні та гідравлічні приводи. Залежно від галузі застосування можуть використовуватися різні схеми побудови механічної частини маніпулятора [17].

Існують такі види промислових роботів різних за своїм призначенням, різними за формою і розмірами, а саме:

- шарнірні роботи;
- декартові і портальні роботи;
- дельта-роботи;
- SCARA-роботи.

1.2 Огляд існуючих рішень

1.2.1 Декартовий промисловий робот CARTESIAN BA05

Декартовий промисловий робот – це простий в управлінні промисловий робот, що працює в прямокутній системі координат.

Модульний декартовий промисловий робот CARTESIAN BA05 з ремінним приводом осей переміщення (рисунок 1.3) має високу швидкість. Даний робот має кілька модифікацій для моделей з ремінним приводом осей, які дозволяють підіймати вантажі до 40 кг при швидкості переміщення до 2000 мм/с.

					IA62.2105AK.005 ПЗ	9
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.3 – Декартовий промисловий робот CARTESIAN BA05 [19]

Модульний декартовий промисловий робот CARTESIAN BA05 з ремінним приводом осей переміщення (рисунок 1.3) має високу швидкість. Даний робот має кілька модифікацій для моделей з ремінним приводом осей, які дозволяють підіймати вантажі до 40 кг при швидкості переміщення до 2000 мм/с. Конкретні значення обох цих параметрів залежать від потужності електродвигуна, яка досягає 200 Вт, а максимальна швидкість пересування залежить також від величини корисного навантаження. Довжина робочого ходу у моделі максимального типорозміру складає до 2500 мм. Точність відтворення переміщень у всіх модифікацій серії дорівнює $\pm 0,05$ мм.

Можливість конфігурацій з двома трьома осями. Простий в застосуванні контролер, стандартний для всіх роботів серії BA. Вбудований пристрій введення / виведення. Інструментальні програмні засоби на основі WINDOWS. Можливість створення багатозадачною системи: з'єднання в один блок до 4 контролерів.

Хороше відношення корисної довжини робочого ходу на кожній осі від 50 до 600 мм до загальної довжини осі довша на 20 мм від робочого ходу. Система ступеня наближення один до одного виявлення фази Z для визначення вихідного положення без датчика. Простота технічного обслуговування і ремонту з використанням змінних модулів. Точність до 0,02 мм. Корисне навантаження 30 кг. При максимальних розмірах промисловий робот важить 30 кілограм.

Приблизна ціна такого робота складає від \$5000 до \$15000 в залежності від комплектації.

1.2.2 Шарнірний робот Universal UR10

Шарнірні роботи рухаються завдяки шарнірам з електродвигунами і мають великий ступінь гнучкості.



Рисунок 1.4 – Шарнірний робот Universal UR10 [5]

Промисловий робот UR10 (рисунок 1.4) – це найбільший робот в лінійці Universal Robots. Він створений для вирішення широкого спектра промислових завдань, де точність рухів і надійність конструкції грають дуже важливу роль.

Робот здійснює завдання по маніпуляції з предметами, вага яких як правило не перевищує 10 кг. Завдяки зоні досяжності в 1,3 метра UR10 автоматизує практично будь-які процеси: від загвинчування до збірки. Від конкурентів його вигідно відрізняє можливість легкого програмування [5].

Даний робот має такі технічні характеристики:

					IA62.2105AK.005 ПЗ	11
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

- вага руки промислового робота з кріпленням складає 17 кг;
- корисне навантаження складає до 28,9 кг, що є дуже достойним показником для шарнірного робота;
- робоча зона складає 1300 мм;
- точність позиціонування: $\pm 0,1$ мм. Серед шарнірних роботів майже відмінний показник, але серед усіх варіантів – достатній;
- ступінь свободи складається з 6 шарнірних з'єднань. Враховуючи складність деталей, є можливість проводити складні маніпуляції з деталями;
- маніпулятор зроблено з алюмінію та поліпропілену;
- температура експлуатації складає від 0 °C до 50 °C;
- управління ведеться завдяки графічному інтерфейсі Polyscope, сенсорний планшет 12". Що покращує проблему з додатковим обладнанням. Та має 2 цифрових входи, 2 цифрових виходу, 2 аналогових входи.

Ціна такого роботу складає від \$20000 до \$30000.

1.2.3 Промисловий робот SCARA TH1050

Цей робот відрізняється тим, що всі основні ланки переміщаються тільки в горизонтальній площині. І тільки інструмент на кінці руки рухається в лінійному напрямку. За рахунок високої жорсткості в вертикальному напрямку роботи SCARA досягають високої точності і швидкості з двигунами меншої потужності [3].

Toshiba Machine TH1050 (рисунок 1.5) являється багатоцільовим роботом з маніпулятором довжиною 1050 мм, кожне плече по 550 мм. Здатний працювати з навантаженням до 20 кг. Його універсальність обумовлена гнучкою системою управління. Така робоча зона: перша вісь до 160° зі швидкістю до 281 гр/с, друга вісь до 145° зі швидкістю до 411 гр/с, третя вісь 200-400 мм зі швидкістю до 2000 мм/с, четверта вісь 360° зі швидкістю до 1147 гр/с. Загалом швидкість складає 8,73 м/с. Для сигналів ручного керування 5 входів та 4 виходи. Важить 75 кг, складний при транспортуванні.

					IA62.210BAK.005 ПЗ	12
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Керується завдяки спеціальному контролеру TS2100.

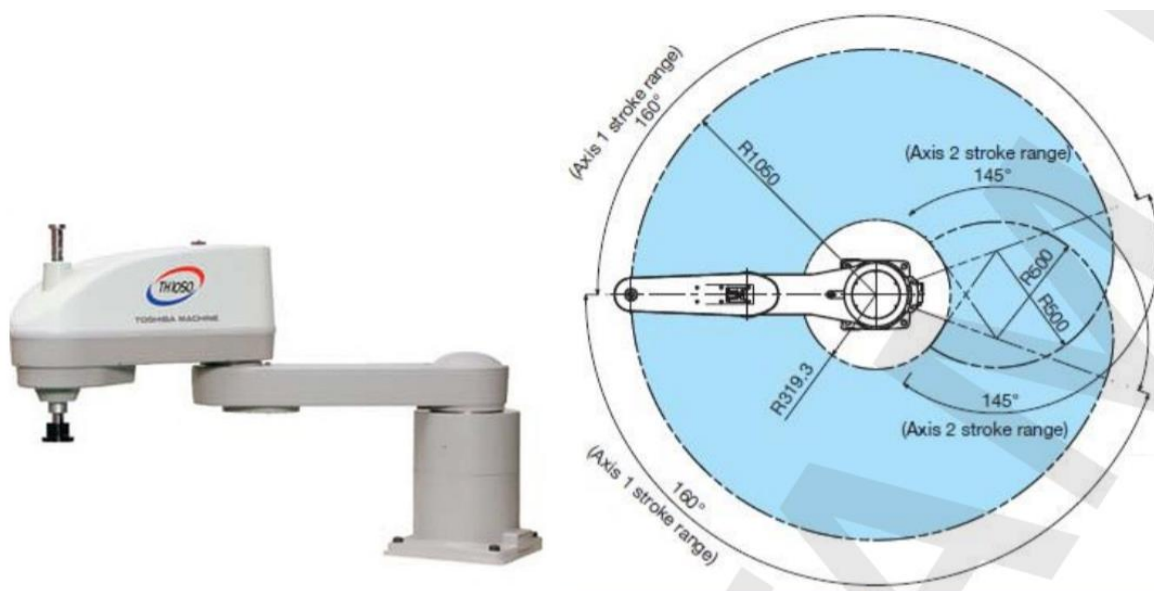


Рисунок 1.5 – Промисловий робот SCARA TH1050 [3]

Кількість програм – до 256. Мова програмування – SCOL, яка спеціально розроблена для SCARA-роботів, подібна до BASIC. Можливе використання персонального комп'ютера для написання програми. 31 або 22 зовнішні входи і виходи, які можуть бути використані для оперативного управління роботом: вибору програми, пуску, зупинки, контролю роботи зовнішніх пристроїв і індикації.

Ціна такого робота складає \$10000.

1.2.4 Дельта-робот SRBD1600

Робот SRBD1600 (рисунок 1.6) спеціально розроблений для умов роботи з великим робочим радіусом і великим навантаженням. Цей тип робота може легко взаємодіяти з візуальною системою і системою транспортування стрічки, щоб досягти ідеальної адаптації до потреб клієнтів. Цей робот може широко використовуватися в таких типах робіт, як упаковка, сортування, транспортування та збирання. Має високу точність повторного позиціонування, яка становить $\pm 0,05$ мм. Час циклу захоплення і установки становить 90 / хв. Діапазон руху такий,

Зм.	Лист	№ док.м.	Підпис	Дата

максимальний діаметр захоплення становить 1600 мм. Висока несуча здатність така, що максимальне навантаження складає 15 кг. Здатність роботи з візуальним позиціонуванням і відстеженням конвеєрної стрічки. Має 3 основні осі. Вага робота – 85 кг. Робоча температура складає від 0 °С до 45 °С.

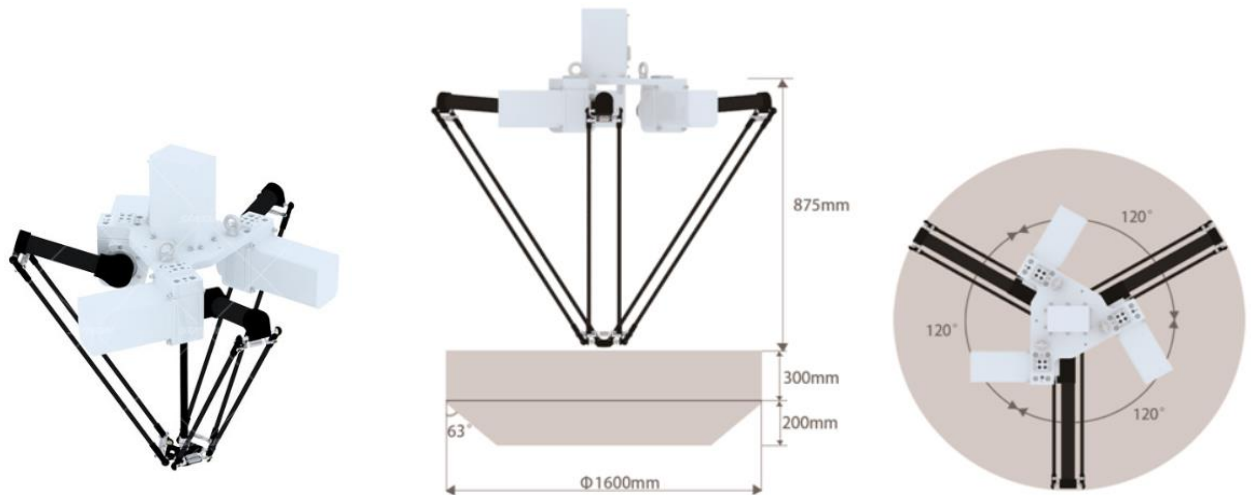


Рисунок 1.6 – Дельта-робот SRBD1600 [20]

Ціна даного робота від \$8000 до \$20000.

1.3 Технічні характеристики обраного типу промислового робота

Після огляду існуючих сучасних рішень було обрано для детального порівняння такі два найбільш відповідні промислові роботи з чотирьох розглянутих вище, як декартовий промисловий робот CARTESIAN BA05 та шарнірний робот Universal UR10.

Інші два представники типів SCARA та дельта-роботів не підходять під задачу свердління деталі, так як більше підходять для сортування або збірки, так як на них нема можливості повороту за різними осями основної голівки на кінці маніпулятора, дана модифікація сильно підвищить вартість даних роботів, а на дельта роботі не рекомендується встановлювати дріль, так як маніпулятор розрахований на невелике навантаження, дана насадка може важити до 5-8 кілограм.

Тепер проведемо порівняння CARTESIAN BA05 та Universal UR10:

- вага самого маніпулятора складає у BA05 30 кг, у UR10 17 кг;
- корисне навантаження складає 30 кг у декартового, та 28,9 кг у шарнірного роботів;
- робоча зона у BA05 до 600х600х600 мм, у UR10 радіус 1300 мм;
- точність у BA05 складає 0,02 мм, у UR10 – 0,1 мм;
- у BA05 до трьох ступенів свободи, у UR10 до шести ступенів свободи, що дає можливість робити отвори під різним кутом нахилу;
- є можливість програмування контролерів промислових роботів завдяки зовнішньому обладнанню;
- коштує до \$15000 BA05, а UR10 – до \$30000, що є в два рази дорожче.

Виходячи з огляду існуючих рішень у дипломному проекті було обрано промисловий робот Universal UR10 типу шарнірний, так як у даного промислового робота є можливість робити отвори під різними кутами.

					IA62.210BAK.005 ПЗ	15
Зм.	Лист	№ док.м.	Підпис	Дата		

2 ОПИС ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯМ ПРОМИСЛОВИМ РОБОТОМ

2.1 Опис керування промисловим роботом UR10

Даний маніпулятор з кутовою системою координат виробляє тільки кутові переміщення (рисунок 2.1), тобто всі його ланки являють собою шарніри.

Всі ступені рухливості обладнані датчиками положення, збудованими на фазоаналоговому принципі. Сигнал неузгодженості по положенню формується як різниця фаз між сигналом з датчика зворотного зв'язку і задаючим сигналом.

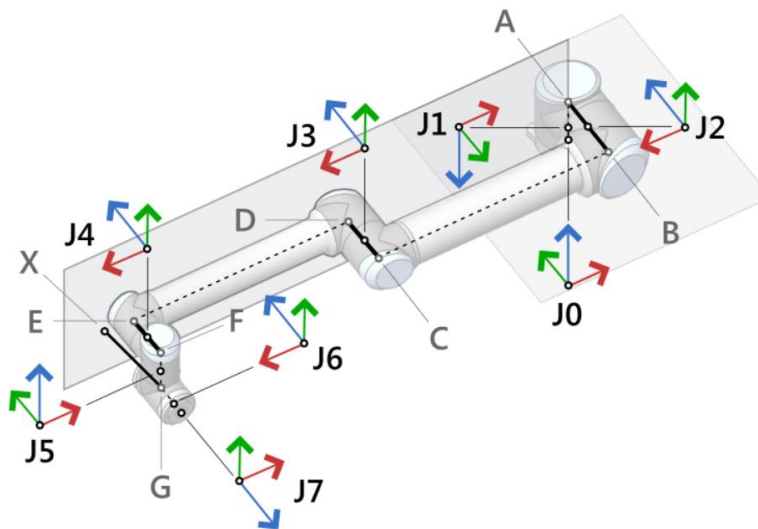


Рисунок 2.1 – Всі кутові переміщення UR10 у точках від J0 до J7 [5]

З одного датчика положення, що розташовані на кожному з'єднанні, отримує три числових вектори, які формують з двох координат для кожної осі за період часу 0,1 секунди. Отримані значення завантажуються з кожного такого датчика у свою групу списків [2].

Далі контролер визначає інформацію про місцезнаходження кожного шарніра робота з використанням кутів Ейлера. Тому на основі системи координат, яка задає орієнтацію насадки інструменту. Кути Ейлера визначалися по загальнодоступним формулами.

Траєкторія руху визначаються поданням положення і методом інтерполяції між положеннями. Об'єднана інтерполяція є базовим типом і відбувається шляхом лінійної інтерполяції в просторі кутів з'єднання

$$J_{\text{Проміжне}}(t) = J_{\text{стартове}} * (1 - t) + J_{\text{кінцеве}} * t \quad (2.1)$$

, де $t: [0, 0, 1]$ для кожної пари сполук [7].

Тому при отриманні з датчиків параметрів позицій, дуже важливе швидке і точне регулювання потрібного кута нахилу шарнірів. Що можна досягти правильним програмним регулюванням.

2.2 Опис структурної схеми цифрової системи керування промисловим роботом

Креслення схеми електричної структурної подано у великому форматі ІА62.210БАК.005 Э1.

Ця схема містить такі елементи: блок датчиків конвеєра, блок керування промисловим роботом, блок виконавчих пристроїв конвеєра, блок датчиків маніпулятора, блок вводу/виводу, блок виконавчих пристроїв маніпулятора.

Блок керування промисловим роботом – складається мікроконтролера, блоків перетворення, які містять в собі цифро-аналогові або аналого-цифрові перетворювачі, джерел живлення конвеєра та маніпулятора.

Кути повороту маніпулятора наведені на кресленику ІА62.210БАК.005 ОВ.

За допомогою таких елементів керування, які знаходяться в блоці вводу/виводу, як інтерфейс для вводу та зміни початкової інформації, призначений для керування роботом оператором або вводу чи завантаження координат для отворів, матеріал деталі, глибина отвору, кількості деталей та маси деталі, щоб робот міг автоматично виконувати поставлені перед ним задачі, екран оператора – пристрій на якому оператор може спостерігати за правильністю вводу інформації

та за своїми діями, панель індикаторів на якій виведені індикатори різних поломок або зношень, критичних навантажень промислового робота.

Блок датчиків маніпулятора містить в собі блок датчиків положення шарнірів, для отримання координат положень частин маніпулятора, датчик перевірки наявності мітки на деталі, який сигналізує наявність чорної мітки на місці отвору в області 30x30 мм, для того щоб звірити правильність введених координат та вирівнятися по осям X та Y при зміщенні від центру області перевірки, та датчик зношення свердла, який сигналізує свердло на зламаність.

Блок датчиків конвеєра складається з двох датчиків, які працюють за допомогою інфрачервоного лазера. Та у контролері перевіряється потрапляння деталі у робочу зону маніпулятора та відправлення деталі за робочу зону.

Блок виконавчих пристроїв конвеєра, який складається з електродвигуна конвеєра, за допомогою якого виконується переміщення конвеєрної стрічки [14].

Блок виконавчих пристроїв маніпулятора у якому містяться блок двигунів маніпулятора, двигуни якого рухають ланки маніпулятора згідно за координатами з датчиків та координатами положень міток, та двигун дрилі [15].

У керуючий блок маніпулятора у базу даних через термінал або комп'ютер завантажуються координати отворів, матеріал деталі, глибина отвору, довжина свердла, кількість деталей та маса деталі у допустимому діапазоні, максимальна швидкість залежить від маси деталі від 0,25 м/с до 0,8 м/с, бо більша швидкість сильно рухатиме легкі деталі при зупинці конвеєра. Максимальна вага 6кг та розміри 1000x1000x10 мм деталі [16]. Після запуску робота інфрачервоні датчики на бортиках конвеєра на початку робочої зони робота фіксують початок деталі та кінець, потім зупиняється конвеєр маніпулятор робить отвори по координатах, після чого під'їжджає наступна деталь. Щоб збільшити ефективність такої системи, потрібно розробити регулятор для промислового робота, який значно пришвидшить промисловий процес.

Послідовність дій така:

- спочатку завантажуються або вводяться координати міток отворів;

- запускається конвеєр з деталями. Наявність деталі та потрапляння у робочу зону маніпулятора відслідковується датчиками конвеєра;
- запускаються двигуни маніпулятора та автоматично керуються за допомогою датчиків положення шарнірів, допустимих середніх норм згинання ланок та введеними координатами міток для отворів;
- після точного вирівнювання зап'ястя маніпулятора за двома осями X та Y з введеними координатами;
- потім вирівнюється за третьою віссю Z відбувається переміщення на мінус 30 мм та довжину свердла від введеної координати;
- далі перевіряється відхилення позиції мітки за даними датчика перевірки наявності мітки на деталі, та корегується положення руки за осями X і Y згідно даним за датчика;
- проводиться рух по осі Z на плюс довжину свердла, 30 мм та глибину отвору, та назад;
- виконуються схожі повторення дій для інших отворів;
- повторення таких самих дій для наступної деталі.

2.3 Опис функціональної схеми цифрової системи керування промисловим роботом

Креслення схеми електричної функціональної надано у великому форматі ІА62.210БАК.005 Э2.

На функціональній схемі показано більш детально принципи дій різних блоків системи.

Датчики, які розташовані на границях робочої зони маніпулятора, на бортиках конвеєра працюють наступним чином: інфрачервоний лазер промінем потраляє на протилежний борт, на якому розташований інфрачервоний приймач. Якщо на інфрачервоний приймач не потрапляє лазер, то це значить, що деталь поступає у робочу зону.

					ІА62.210БАК.005 ПЗ	19
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Датчик перевірки наявності мітки на деталі – це маленька камера 1,3MP на відстані 30 мм отримує зображення 30х30 мм розміром 320х320 пікселів після кореляції сигналу. За допомогою результатів вираховується відхилення мітки від центру, та додається відхилення введеним координатам.

Сам регулятор положення розташований у блоці перетворень де відбувається управління напругою для більш точного и швидкого корегування позиції відхилення.

Задаються координати для отвори через термінал, а саме координати над отверсием і координати глибини. Далі вони потрапляють в мікроконтролер. З датчиків положень шарнірів передаються координати в мікроконтролер і порівнюються координати задані і поточних позицій, далі за допомогою формул кутів Ейлера обчислюється кут нахилу шарніра. подається напруга на шарніри до тих пір поки координати датчиків не співпадуть з заданими координатами. Після збігу координат маніпулятор включає дріль і за допомогою 3-х шарнірів почне рухати дріль в сторону деталі на потрібну глибину, яка задається і також звіряється з датчиками положення шарнірів. Після досягнення потрібної глибини, маніпулятор рухається в зворотному положенні до координати над отвором. І чекає координат для наступного отвори. Якщо один отвір, то рух буде відбуватися до координати глибини, якщо кілька, то повторюється процедура для досягнення потрібних координат знову і потім, процедура заглиблення.

					IA62.2105AK.005 ПЗ	20
Зм.	Лист	№ док.м.	Підпис	Дата		

3 РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ

3.1 Визначення еквівалентних параметрів для ланцюга якоря двигуна постійного струму

При керуванні двигуном постійного струму за керуванням ланцюгом якоря відбувається керування за вхідним впливом, яким є струм якоря и має таку диференційну форму [18]:

$$x(t) = Ry(t) + L \frac{dy(t)}{dt}, \quad (3.1)$$

де R – еквівалентний опір ланцюга якоря,

де L – еквівалентна індуктивність ланцюга якоря.

Та з урахуванням приведенного навантаження в диференційній формі:

$$x(t) = J \frac{dy(t)}{dt} + y(t), \quad (3.2)$$

де J – приведений момент інерції.

Таблиця 3.1 – характеристики маніпулятора UR10 [5]

Вага рухомої частини	14,264 кг
Охоплення	1300 мм
Постійна двигуна	0,5 в*с
Опір обмотки якоря двигуна	3,14 Ом
Сила струму двигуна	3,5 А
Робоча напруга	220 В
Кількість витків двигуна	2200
Компенсуюча обмотки	0.4
Число фаз випрямленої напруги	6

Індуктивний опір фази трансформатора	0,408 Ом
Індуктивність фази трансформатора	0,0013 Гн

Знаходження опору обмотки якоря з урахуванням нагріву:

$$R_{яТ} = 1,2 * R_{я}, \text{ Ом}, \quad (3.3)$$

де $R_{я}$ – опір обмотки якоря двигуна за температури 16 °С.

$$R_{яТ} = 1,2 * 3,14 = 3,768 \text{ Ом}.$$

Визначення опору, обумовленого комутаційними процесами в тиристорному перетворювачі:

$$R_{тп} = \frac{X * m}{2\pi}, \text{ Ом}, \quad (3.4)$$

де X – індуктивний опір фази трансформатора, m – число фаз випрямленої напруги.

$$R_{тп} = \frac{0,408 * 6}{2\pi} = 0,389 \text{ Ом}.$$

Визначення опору щіткового контакту двигуна:

$$R_{щ} = \frac{2}{I}, \text{ Ом}, \quad (3.5)$$

$$R_{тп} = \frac{2}{3,5} = 0,571 \text{ Ом}.$$

Визначення еквівалентного опору ланцюга якоря:

					ІА62.210БАК.005 ПЗ	22
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R_{e.я} = R_{яТ} + R_{ф.тр.} + R_{ТП} + R_{ш}, \text{ Ом}, \quad (3.6)$$

$$R_{e.я} = 3,768 + 0,365 + 0,389 + 0,571 = 5,093 \text{ Ом}.$$

Визначення індуктивності обмотки якоря:

$$L_{я} = \frac{30 * U * C}{\pi * n * I}, \text{ Гн}, \quad (3.7)$$

де $C = 0,4$ – з компенсуючою обмоткою, n – кількість витків.

$$L_{я} = \frac{30 * 220 * 0,4}{\pi * 2200 * 3,5} = 0,109 \text{ Гн}.$$

Еквівалентна індуктивність ланцюга якоря:

$$L_{e.я} = L_{я} + L_{ф.тр.}, \text{ Гн}, \quad (3.8)$$

$$L_{e.я} = 0,109 + 0,0013 = 0,1103 \text{ Гн}.$$

Приведений момент інерції:

$$J = m_m * r^2, \quad (3.9)$$

де m_m – маса рухомої частини маніпулятора, r^2 – половина максимальної довжини радіуса маніпулятора, тому що маса робочої частини маніпулятора розподілена майже рівномірно.

$$J = 14,264 * 0,65^2 = 6,02654.$$

При русі маніпулятора, постійна двигуна 0,5 та протиЕРС 0,5 компенсують одне одного.

Обрані фізичні параметри наведено в таблиці 3.1.

					IA62.210БАК.005 ПЗ	23
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2 Перетворення Лапласа

Перетворенням Лапласа – це перетворення зображення функції оригіналу $f(t)$ у певне інтегральне перетворення у функцію $F(s)$:

$$F(s) = \int_0^{+\infty} e^{-st} f(t) dt. \quad (3.10)$$

Для перетворення похідних застосуємо теорему про диференціювання оригіналу:

$$f'(t) = S * F(s) - f(0), \quad (3.11)$$

$$f''(t) = S^2 * F(s) - S * f(0) - f'(0). \quad (3.12)$$

Виконуємо перетворення Лапласа:

$$x(S) = Ry(S) + LSy(S),$$

$$x(S) = JSy(S) + y(S).$$

Передавальної функцією $W(s)$ називається відношення зображення виходу функції до зображення її входу.

$$W_1(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{R+LS} = \frac{1}{5,093+0,1103S},$$

$$W_2(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{JS+1} = \frac{1}{6,02654S+1}.$$

Для отримання повної передавальної функції перехідного процесу положення потрібно зробити добуток двох послідовних передавальних функцій та домноживши на інтегральну ланку:

$$W_3(s) = \frac{1}{s},$$

$$W_1(s) * W_2(s) * W_3(s) = W(s). \quad (3.13)$$

Після добутку ми отримаємо таку функцію:

$$W_{\text{вч}}(s) = \frac{1}{0,6647s^3 + 30,8s^2 + 5,093s}.$$

Змоделюємо дану передавальну функцію перехідного процесу керування промисловим роботом в середовищі додатка Matlab у програмному пакеті Simulink (рисунок 3.1).

Перехідний процес – це реакція на вхідний вплив динамічної системи. У даному випадку відображається зміна координат до певного незмінного значення, якщо стійка система. Перехідний процес є дуже важливий при розгляданні характеристик та якості досліджуваної системи [1].

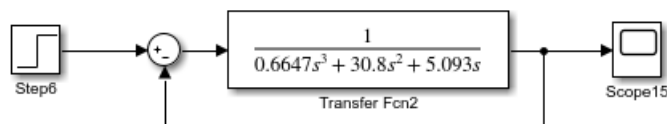


Рисунок 3.1 – Безперервна передавальна функція керування промисловим роботом

Завдяки цьому додатку можна спостерігати динаміку перехідного процесу за певний проміжок часу (рисунок 3.2).

На рисунку 3.2 можемо побачити, що час перехідного процесу до задовільного стану за 48,770 секунди і до стабільного за 71,288 секунди. Без регулятора це дуже повільний час переходу функції до стабільного стану.

Для цього потрібно зробити Z-перетворення.

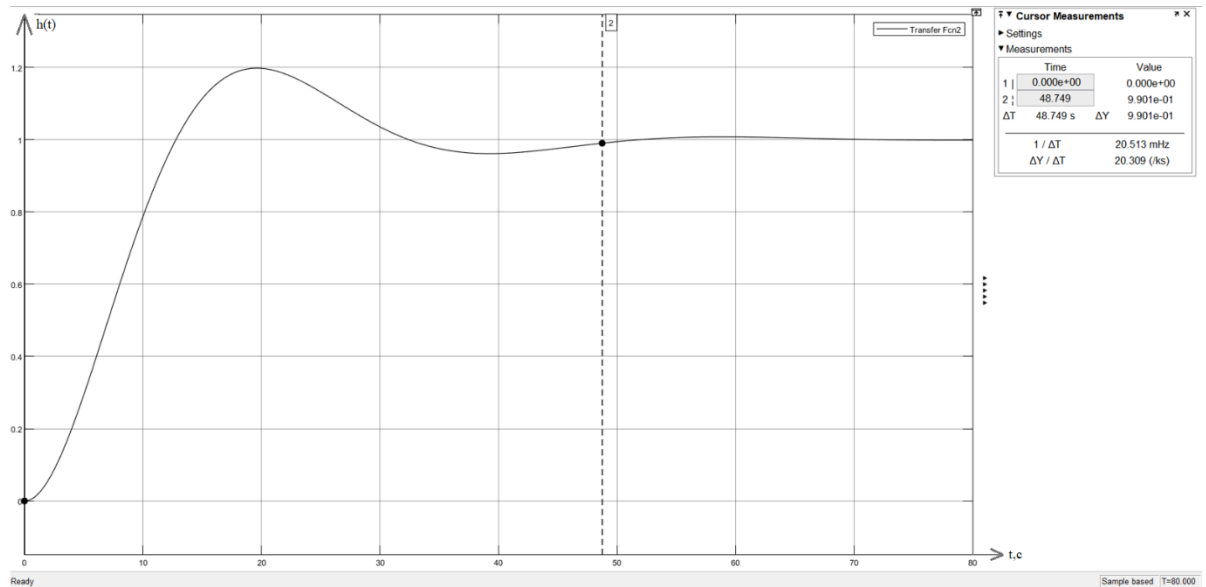


Рисунок 3.2 – Графік перехідного процесу функції керування однієї ланки промислового робота

3.3 Z-перетворення

Z-перетворення – це метод аналізу дискретних цифрових послідовностей. Для дискретизації сигналу за певними проміжками часу [4].

Цифрова система – система, яка має цифрові обчислювальні складові. Така система отримує значення тільки у дискретні моменти часу, у проміжках моментів часу інформація невідома.

Передавальна функція приведеної безперервної частини обчислюється наступним чином:

$$W_{\text{пбч}}(s) = \frac{1 - e^{-T_0 s}}{s} W_{\text{бч}}(s), \quad (3.14)$$

$$W_{\text{пбч}}(z) = \mathbb{Z} \left\{ \frac{1 - e^{-T_0 s}}{s} W_{\text{бч}}(s) \right\} = \mathbb{Z} \left\{ \frac{W_{\text{бч}}(s)}{s} \right\} - \mathbb{Z} \left\{ \frac{e^{-T_0 s} W_{\text{бч}}(s)}{s} \right\}. \quad (3.15)$$

Застосуємо теорему про заміщення аргументу в оригіналі:

$$\mathbb{Z}\{f(t \pm vT)\} = \mathbb{Z}\{e^{\pm vT_0 s} F(s)\} = z^{\pm v} \mathbb{Z}\{F(s)\}, \quad (3.16)$$

тоді,

$$\mathbb{Z}\left\{\frac{W_{6ч}(s)}{s}\right\} - z^{-1}\mathbb{Z}\left\{\frac{W_{6ч}(s)}{s}\right\} = \frac{z-1}{z}\mathbb{Z}\left\{\frac{W_{6ч}(s)}{s}\right\}. \quad (3.17)$$

Використовуємо наступні формули для Z-перетворення:

$$\frac{1}{s+a} = \frac{z}{z-e^{-aT}}, \quad (3.18)$$

$$\frac{1}{s} = \frac{z}{z-1}, \quad (3.19)$$

$$\frac{1}{s^2} = \frac{Tz}{(z-1)^2}. \quad (3.20)$$

Система повинна мати на один менше нулів ніж полюсів, а ступень знаменника повинна бути більше, ніж чисельника. Було обрано час квантування $T = 0.1\text{с}$.

Підставимо у формулу Z-перетворення на місце $W_{6ч}$ свою функцію перехідного процесу, отримаємо:

$$W_{п6ч}(z) = \frac{z-1}{z}\mathbb{Z}\left\{\frac{W_{6ч}(s)}{s}\right\} = \frac{z-1}{z}\mathbb{Z}\left\{\frac{1}{0,6647s^4 + 30,8s^3 + 5,093s^2}\right\}.$$

Знайдемо корені рівняння знаменника для подальшого розрахунку. Спочатку знайдемо дискримінант:

$$D = 30,8^2 - 4 * 0,6647 * 5,093 = 935,0987.$$

Знайдемо корені дискримінанту:

$$S_{1,2} = \frac{-30,8 \pm \sqrt{935,0987}}{2 * 0,6647} = \frac{-30,8 \pm 30,5794}{2 * 0,6647}.$$

Такі отримані корені:

$$S_1 = -0,1659,$$

$$S_2 = -46,1708.$$

Запишемо формулу з розкладеним знаменником наступним чином:

$$W_{\text{пбч}}(z) = \frac{z-1}{z} \mathbb{Z} \left\{ \frac{1}{S^2(S+0,1659)(S+46,1708)} \right\}.$$

Далі розкладемо дріб на суму простих дробів:

$$W_{\text{пбч}}(z) = \frac{z-1}{z} \mathbb{Z} \left\{ \frac{A}{S} + \frac{B}{S^2} + \frac{C}{S+0,1659} + \frac{D}{S+46,1708} \right\}.$$

Знаходимо невідомі дробів:

$$AS(S+0,1659)(S+46,1708) + B(S+0,1659)(S+46,1708) + CS^2(S+46,1708) + DS^2(S+0,1659) = 1.$$

Прирівняємо S до 0, тоді:

$$B(0+0,1659)(0+46,1708) = 1.$$

Знайдемо першу невідому B:

$$B = \frac{1}{7,6597} = 0,1306.$$

Прирівняємо S до -0,1659, тоді:

$$C(-0,1659)^2(-0,1659 + 46,1708) = 1.$$

Перемножимо дужки:

$$C * 0,0275 * 46,0049 = 1,$$

тоді:

$$C = \frac{1}{1,2651} = 0,7904.$$

Прирівняємо S до -46,1708, тоді:

$$D(-46,1708)^2(-46,1708 + 0,1659) = 1.$$

Перемножимо дужки:

$$D * 2131,7428 * (-46,0049) = 1.$$

Отримаємо:

$$D = \frac{1}{-98070,6143} = -0,000010197.$$

Прирівняємо S до 1, тоді:

$$\begin{aligned} A * 1 * (1 + 0,1659)(1 + 46,1708) + B(1 + 0,1659)(1 + 46,1708) + \\ + C * 1^2 * (1 + 46,1708) + D * 1^2 * (1 + 0,1659) = 1, \\ A(1,1659)(47,1708) + B(1,1659)(47,1708) + C(47,1708) + \end{aligned}$$

					ІА62.210БАК.005 ПЗ	29
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$+D(1,1659) = 1.$$

Розкриємо дужки:

$$A * 54,9964 + B * 54,9964 + C * 47,1708 + \\ +D * 1,1659 = 1.$$

Робимо заміну невідомих B, C та D на $B = 0,1306$, $C = 0,7904$ та $D = -0,000010197$:

$$A * 54,9964 + 0,1306 * 54,9964 + 0,7904 * 47,1708 + \\ +(-0,000010197) * 1,1659 = 1, \\ A * 54,9964 + 7,1825 + 37,2838 + 0,0000117 = 1; \\ A = -0,7903.$$

Підсумуємо знайдені невідомі простих дробів:

$$A = -0,7903, \\ B = 0,1306, \\ C = 0,7904, \\ D = -0,00001.$$

Підставимо всі знайдені невідомі у формулу $W_{\text{пбч}}$:

$$W_{\text{пбч}}(z) = \frac{z-1}{z} \mathbb{Z} \left\{ \frac{-0,7903}{s} + \frac{0,1306}{s^2} + \frac{0,7904}{s+0,1659} + \frac{(-0,00001)}{s+46,1708} \right\}.$$

Використовуємо формули z-перетворень простих дробів:

$$\frac{-0,7903}{s} = \frac{(-0,7903) * z}{z-1},$$

					IA62.210БАК.005 ПЗ	30
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{0,1306}{S^2} = \frac{0,01306 * z}{(z - 1)^2},$$

$$\frac{0,7904}{S + 0,1659} = \frac{0,7904 * z}{z - e^{-0,01659}},$$

$$\frac{-0,0000102}{S + 46,1708} = \frac{-0,0000102 * z}{z - e^{-4,61708}}.$$

Підставимо замість простих дробів з S отримані прості z-перетворені дробки:

$$W_{\text{пбч}}(z) = \frac{z - 1}{z} \left(\frac{-0,7903 * z}{z - 1} + \frac{0,01306 * z}{(z - 1)^2} + \frac{0,7904 * z}{z - e^{-0,01659}} + \frac{-0,0000102 * z}{z - e^{-4,61708}} \right)$$

$$= \frac{z - 1}{z} * \frac{(-0,7903) * z * (z - 1) * (z - e^{-0,01659}) * (z - e^{-4,61708}) +$$

$$+ 0,01306 * z * (z - e^{-0,01659}) * (z - e^{-4,61708}) + 0,7904 * z * (z - 1)^2 *$$

$$* (z - e^{-4,61708}) - 0,0000102 * z * (z - 1)^2 * (z - e^{-0,01659})}{(z - 1)^2 * (z - e^{-0,01659}) * (z - e^{-4,61708})} =$$

$$= \frac{(-0,7903) * (z - 1) * (z - 0,983547) * (z - 0,0098816) +$$

$$+ 0,01306 * (z - 0,983547) * (z - 0,0098816) + 0,7904 * (z - 1)^2 *$$

$$* (z - 0,0098816) - 0,0000102 * (z - 1)^2 * (z - 0,983547)}{(z - 1) * (z - 0,9835465124) * (z - 0,009881587566)} =$$

$$= \frac{0,0001102z^2 + 0,0002413z + 0,000126}{z^3 - 1,993428z^2 + 1,003147z - 0,009719}.$$

У даній передавальній функції безперервної частини можна спостерігати астатизм першого порядку, тому винесемо в знаменнику $(z - 1)$ за дужки для подальшої роботи з функцією:

$$\frac{z^3 - 1,993428z^2 + 1,003147z - 0,009719}{z - 1} = z^2 - 0,993428z + 0,009719,$$

$$W_{\text{пбч}}(z) = \frac{0,0001102z^2 + 0,0002413z + 0,000126}{(z - 1)(z^2 - 0,993428z + 0,009719)}.$$

3.4 Z-перетворення за допомогою додатка Matlab

Введемо всі функції перехідного процесу керування промисловим роботом у додатку Matlab (рисунок 3.5).

Для отримання однієї безперервної передавальної функції зробимо добуток функцій W_1 , W_2 та W_3 (рисунок 3.3).

Зробимо Z-перетворення у додатку Matlab (рисунок 3.4) за допомогою спеціальної функції з часом квантування 0,1 секунда.

```
>> w4=w1*w2*w3

w4 =

          1
-----
0.6647 s^3 + 30.8 s^2 + 5.093 s

Continuous-time transfer function.
```

Рисунок 3.3 – Запис добутку функцій W_1 , W_2 та W_3 у додатку Matlab.

Винесемо в знаменнику $(z - 1)$ за дужки, як було зроблено в передавальній функції, порахованої вручну.

```
>> wz=c2d(w4,0.1)

wz =

0.000107 z^2 + 0.0002003 z + 1.265e-05
-----
z^3 - 1.993 z^2 + 1.003 z - 0.009716

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time transfer function.
```

Рисунок 3.4 – Z-перетворення у додатку Matlab.

```
>> w1=tf([1],[0.1103 5.093])

w1 =

          1
-----
0.1103 s + 5.093

Continuous-time transfer function.

>> w2=tf([1],[6.02654 1])

w2 =

          1
-----
6.027 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> w3=tf([1],[1 0])

w3 =

          1
-----
s

Continuous-time transfer function.
```

Рисунок 3.5 – Запис безперервних передавальних функції у додатку Matlab.

Змоделюємо у програмному пакеті Simulink функцію після Z-перетворення, розраховану вручну, та функцію після Z-перетворення, розраховану у додатку Matlab (рисунок 3.6).

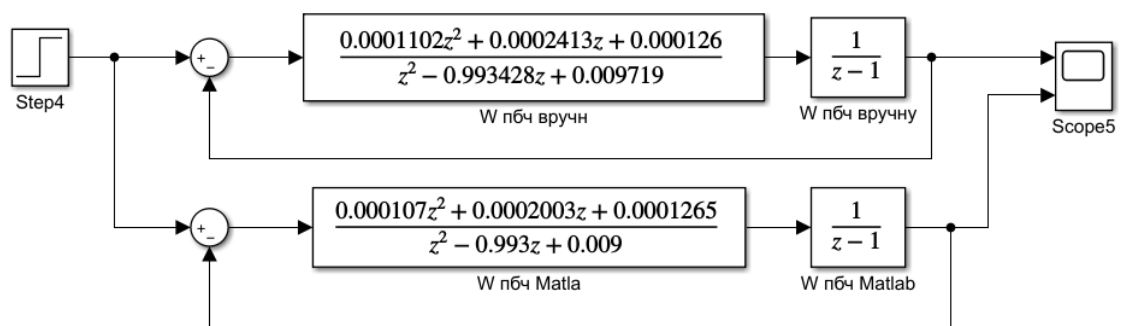


Рисунок 3.6 – Передаточні функції $W_{\text{пбч}}$ порахована вручну, $W_{\text{пбч}}$ порахована у Matlab в програмному пакеті Simulink.

Порівняємо на рисунку 3.7 графіки передаточних функцій змодельованих на рисунку 3.6.

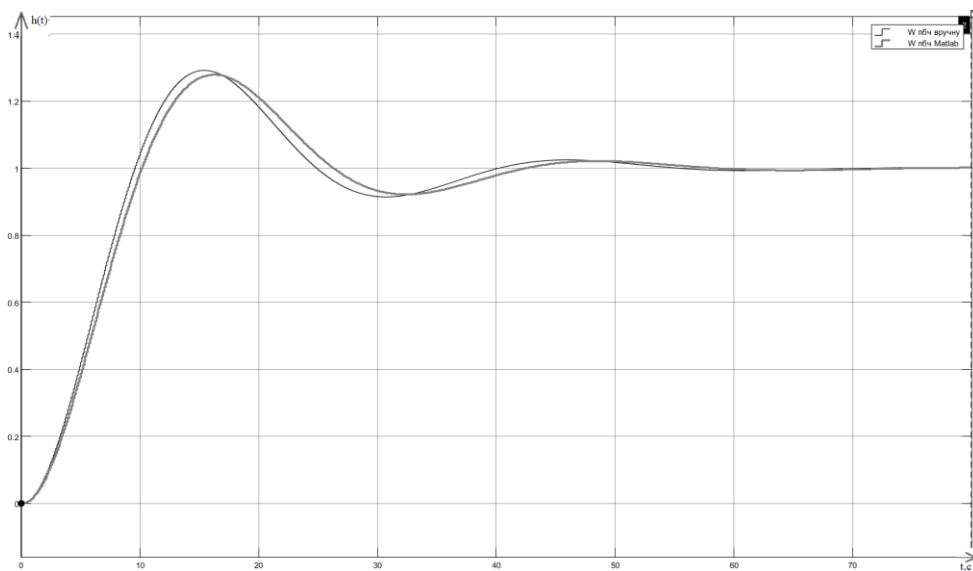


Рисунок 3.7 – Графік передаточних функцій $W_{пбч}$ порахованої вручну, $W_{пбч}$ порахованої у Matlab в програмному пакеті Simulink.

Можна спостерігати час встановлення 9,428 секунди, час перехідного процесу 46 секунд, 29,2% перерегулювання, та 0% помилку, також схожість графіків цифрових передаточних функцій між собою. Різниця незначна, тому можна продовжити у наступному розділі аналіз стійкості та якості перехідного процесу після Z-перетворення, порахованого вручну.

4 АНАЛІЗ ЯКОСТІ ТА СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ

4.1 Аналіз стійкості цифрової системи за допомогою загального алгоритму

Стійкість замкненої системи автоматичного управління — одна з найважливіших вимог до систем автоматичного управління. У стійкої систем автоматичного управління при будь-якому реальному збуренні на систему регульована величина при перехідному процесі не буде нескінченно відхилятися від заданого значення. Існує багато критеріїв стійкості САР, як аналітичних, так і графічних.

У загальному, дослідження стійкості — це знаходження коренів характеристичного рівняння замкнутої цифрової системи.

Передавальна функція замкнутої цифрової системи має такий вигляд.

$$W_3(z) = \frac{W_{\text{пбч}}(z)}{1 + W_{\text{пбч}}(z)}. \quad (4.1)$$

Підставимо замість $W_{\text{пбч}}(z)$ свою цифрову передавальну функцію:

$$\begin{aligned} W_{\text{пбч}}(z) &= \frac{0,0001102z^2 + 0,0002413z + 0,000126}{(z - 1)(z^2 - 0,993428z + 0,009719)}, \\ W_3(z) &= \frac{\frac{0,0001102z^2 + 0,0002413z + 0,000126}{(z - 1)(z^2 - 0,993428z + 0,009719)}}{1 + \frac{0,0001102z^2 + 0,0002413z + 0,000126}{(z - 1)(z^2 - 0,993428z + 0,009719)}} = \\ &= \frac{\frac{0,0001102z^2 + 0,0002413z + 0,000126}{(z - 1)(z^2 - 0,993428z + 0,009719)}}{\frac{z^3 - 1,9933178z^2 + 1,0033883z - 0,009593}{(z - 1)(z^2 - 0,993428z + 0,009719)}} = \\ &= \frac{0,0001102z^2 + 0,0002413z + 0,000126}{z^3 - 1,9933178z^2 + 1,0033883z - 0,009593}. \end{aligned}$$

Знаменник $W_3(z)$ зветься характеристичним рівнянням замкнутої системи та позначається як $D(z)$.

Характеристичне рівняння системи – рівняння, отримане, коли прирівнюють чисельник або знаменник передаточної функції до нуля [8].

Знаходимо корені рівняння $D(z) = 0, z_i, i = \overline{1, n}$. n – порядок поліному $D(z)$. Умовою стійкості системи є $|z_i| < 1$, що відповідає розташуванню коренів характеристичного рівняння у колі одиничного радіусу на z - площині.

Знайдемо корені характеристичного рівняння:

$$D(z) = z^3 - 1,9933178z^2 + 1,0033883z - 0,009593.$$

Робимо заміну змінної:

$$z = x + 0,664439267,$$

$$(x + 0,664439267)^3 - 1,9933178 * (x + 0,664439267)^2 + 1,0033883 * (x + 0,664439267) - 0,009593 = 0.$$

Спростуємо отримане рівняння шляхом формули скороченого множення:

$$x^3 + 3 * 0,664439267 * x^2 + 3 * 0,664439267^2 * x + 0,664439267^3 - 1,9933178 * (x^2 + 2 * 0,664439267 * x + 0,664439267^2) + 1,0033883 * (x + 0,664439267) - 0,009593 = 0.$$

Продовжимо скорочення розкриттям скобок:

$$x^3 + 1,9933178 * x^2 + \frac{3,97331585179684}{3} * x + 0,2933363412 - 1,9933178 * x^2 - \frac{7,94663170359}{3} * x - 0,8800090236 + 1,0033883 * x + 0,666690586 - 0,009593 = 0.$$

Групуємо доданки:

					ІА62.210БАК.005 ПЗ	36
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$x^3 - 0,3210503172656133 * x + 0,0704249038332615 = 0.$$

Робимо підстановку Вієта:

$$x = u + \frac{0,1070167724218711}{u},$$

$$\left(u + \frac{0,1070167724218711}{u}\right)^3 - 0,3210503172656133 * \\ * \left(u + \frac{0,1070167724218711}{u}\right) + 0,0704249038332615 = 0.$$

Спростуємо отриманий вираз, використавши формулу скороченого множення:

$$u^3 + \frac{3 * 0,1070167724218711 * u^2}{u} + 3 * \left(\frac{0,1070167724218711}{u}\right)^2 * u + \\ + \left(\frac{0,1070167724218711}{u}\right)^3 - 0,3210503172656133 * \\ * \left(u + \frac{0,1070167724218711}{u}\right) + 0,0704249038332615 = 0.$$

Продовжуємо спрощення:

$$u^3 + 0,3210503172656133 * u + \frac{0,103073306216351}{3 * u} + \\ + \frac{0,0330917176623752}{27 * u^3} - 0,3210503172656133 * u - \\ - \frac{0,103073306216351}{3 * u} + 0,0704249038332615 = 0.$$

Приводимо подібні доданки:

$$u^3 + \frac{0,0330917176623752}{27 * u^3} + 0,0704249038332615 = 0.$$

					ІА62.210БАК.005 ПЗ	37
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Домножемо отриманий вираз на u^3 :

$$u^6 + 0,0704249038332615 * u^3 + 0,001225619172680562 = 0.$$

Робимо заміну змінної:

$$u = \sqrt[3]{v}.$$

Ми отримаємо квадратне рівняння відносно змінної v :

$$v^2 + 0,0704249038332615 * v + 0,001225619172680562 = 0.$$

Рахуємо дискримінант квадратного рівняння по формулі:

$$D = b^2 - 4 * a * c = (0,0704249038332615)^2 - 4 * 0,001225619172680562 = 0,000057190389201882.$$

Оскільки $D < 0$, то вираз має два комплексноспряженних корені:

$$v_1 = \frac{-b + \sqrt{D}}{2 * a} = \frac{-0,0704249038332615 + i * \sqrt{0,000057190389201882}}{2} = -0,03143123553820561,$$

$$v_2 = \frac{-b - \sqrt{D}}{2 * a} = \frac{-0,0704249038332615 - i * \sqrt{0,000057190389201882}}{2} = -0,03899366829505588.$$

Із двох отриманих значень v_1 та v_2 вибираю одне любе значення, на результаті це ніяк не відобразиться.

Підставляю отримане значення v_1 у вираз $u = \sqrt[3]{v}$:

					ІА62.210БАК.005 ПЗ	38
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$u = \sqrt[3]{-0,03143123553820561}.$$

Відомо, що корінь третього ступеня любого числа має три значення:

$$\begin{aligned} u_1 &= 0,1577940011828283 + i * 0,2733072271782414, \\ u_2 &= -0,315588002365656, \\ u_3 &= 0,157794001 1828264 - i * 0,2733072271782423. \end{aligned}$$

Отримаємо всі три корені рівняння:

$$\begin{aligned} x &= u + \frac{0,1070167724218711}{u}, \\ x_1 &= 0,1577940011828283 + i * 0,2733072271782414 + \\ &\quad + \frac{0,1070167724218711}{0,1577940011828283 + i * 0,2733072271782414}, \\ x_2 &= -0,315588002365656 + \frac{0,1070167724218711}{(-0,315588002365656)}, \\ x_3 &= 0,157794001 1828264 - i * 0,2733072271782423 + \\ &\quad + \frac{0,7759423057552}{0,157794001 1828264 - i * 0,2733072271782423}. \end{aligned}$$

Після перерахунку виразів отримаємо:

$$\begin{aligned} x_1 &= 0,3273453967043163 - i * 0,0203644043591813, \\ x_2 &= -0,654690793408631, \\ x_3 &= 0,3273453967043127 + t 0,0203644043 591819. \end{aligned}$$

Отримаємо такі три корені, підставивши у формулу z:

$$\begin{aligned} z &= x - 0,664439267, \\ z_2 &= 0,00974847, \end{aligned}$$

					IA62.210БАК.005 ПЗ	39
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$z_{1,3} = 0,99178466 \pm i * 0,0203644.$$

Знаходимо модуль $z_{1,2}$:

$$|z_{1,3}| = \sqrt{u^2 + v^2} = \sqrt{0,99178466^2 + 0,0203644^2} = 0,9919937, \quad (4.2)$$

$$|z_i| < 1.$$

Умову стійкості дана система проходить, тому система за допомогою загального алгоритму є стійкою.

Так як виконуються умови стійкості цифрова система стійка.

4.2 Аналіз стійкості цифрової системи за допомогою критерію Гурвіца

Критерію Гурвіца – це спосіб аналізу лінійної динамічної системи на стійкість, який розробив німецький математик Адольф Гурвіц. Цей критерій займає своє місце біля критерія Рауса, який є алгебраїчним критерієм стійкості, на відміну від частотних критеріїв, наприклад критерій стійкості Найквіста [6].

Для застосування критерію Гурвіца необхідно виконати білінійне перетворення для чого у $D(z)$ використовується підстановка:

$$z = \frac{1+w}{1-w}. \quad (4.3)$$

В отриманому виразі $D(w)$ розглядається знаменник до якого і застосовують критерій Гурвіца аналогічно до безперервних систем.

Зробимо заміну $z = \frac{1+w}{1-w}$ в рівнянні $D(z)$:

$$D(z) = z^3 - 1,9933178z^2 + 1,0033883z - 0,009593,$$

					ІА62.210БАК.005 ПЗ	40
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\left(\frac{1+w}{1-w}\right)^3 - 1,9933178 * \left(\frac{1+w}{1-w}\right)^2 + 1,0033883 * \left(\frac{1+w}{1-w}\right) - 0,009593 = 0.$$

Домножимо обидві частини рівняння на відповідні множники, щоб позбутися від знаменника:

$$1 + 3w + 3w^2 + w^3 - 1,9933178(1 + 2w + w^2)(1 - w) + 1,0033883(1 + w)(1 - 2w + w^2) - 0,009593(1 - 3w + 3w^2 - w^3) = 0.$$

Розкриємо перші дужки членів рівняння:

$$1 + 3w + 3w^2 + w^3 - (1,9933178 + 3,986656w + 1,9933178w^2)(1 - w) + (1,0033883 + 1,0033883w)(1 - 2w + w^2) - 0,009593 + 0,028779w - 0,028779w^2 + 0,009593w^3 = 0.$$

Розкриємо всі дужки рівняння:

$$1 + 3w + 3w^2 + w^3 - 1,9933178 - 3,986656w - 1,9933178w^2 + 1,9933178w + 3,986656w^2 + 1,9933178w^3 + 1,0033883 - 2,0067766w + 1,0033883w^2 + 1,0033883w - 2,0067766w^2 + 1,0033883w^3 - 0,009593 + 0,028779w - 0,028779w^2 + 0,009593w^3 = 0.$$

Складемо усі доданки рівняння та отримаємо такий вираз:

$$4,0062991w^3 + 3,9611505w^2 + 0,0320729w + 0,0004775 = 0.$$

Тепер проведемо аналіз стійкості за наступною умовою:

$$\begin{cases} a_i > 0 \\ a_1 * a_2 - a_0 * a_3 > 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

					IA62.210БАК.005 ПЗ	41
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Підставимо в рівняння умови отримані числа:

$$3,9611505 * 0,0320729 - 4,0062991 * 0,0004775 = 0,125132576 > 0.$$

Умова стійкості виконується, тобто система стійка.

4.3 Аналіз стійкості цифрової системи за допомогою критерію Найквіста

Аналіз стійкості за допомогою частотного критерію Найквіста потребує побудови відносно псевдочастоти амплітудно-фазочастотної характеристики (АФЧХ) розімкнутої системи. Якщо на вхід цифрової системи подається

$$g[n] = a \sin[n\omega T_0], \quad (4.5)$$

тоді на виході маємо

$$y[n] = b \sin[n\omega T_0 + j]. \quad (4.6)$$

Частотна передавальна функція змінною z може бути отримана з $W(z)$:

$$z = e^{j\omega T_0}. \quad (4.7)$$

Після цього можна будувати відносно ω різні частотні характеристики. Але трансцендентні вирази виходять в результат, тому цей метод не отримав розповсюдження. і застосовують метод побудови характеристик відносно псевдо частоти λ .

Визначається число полюсів l передавальної функції $W_{\text{нбч}}(z)$, що лежать поза колом одиничного радіуса.

Замкнута система є стійкою якщо АФЧХ розімкнутої системи охоплює точку $(-1; j0)$ $l/2$ разів.

Для розрахунку критерія Найквіста скористаємося додатком Matlab (рисунок 4.1).

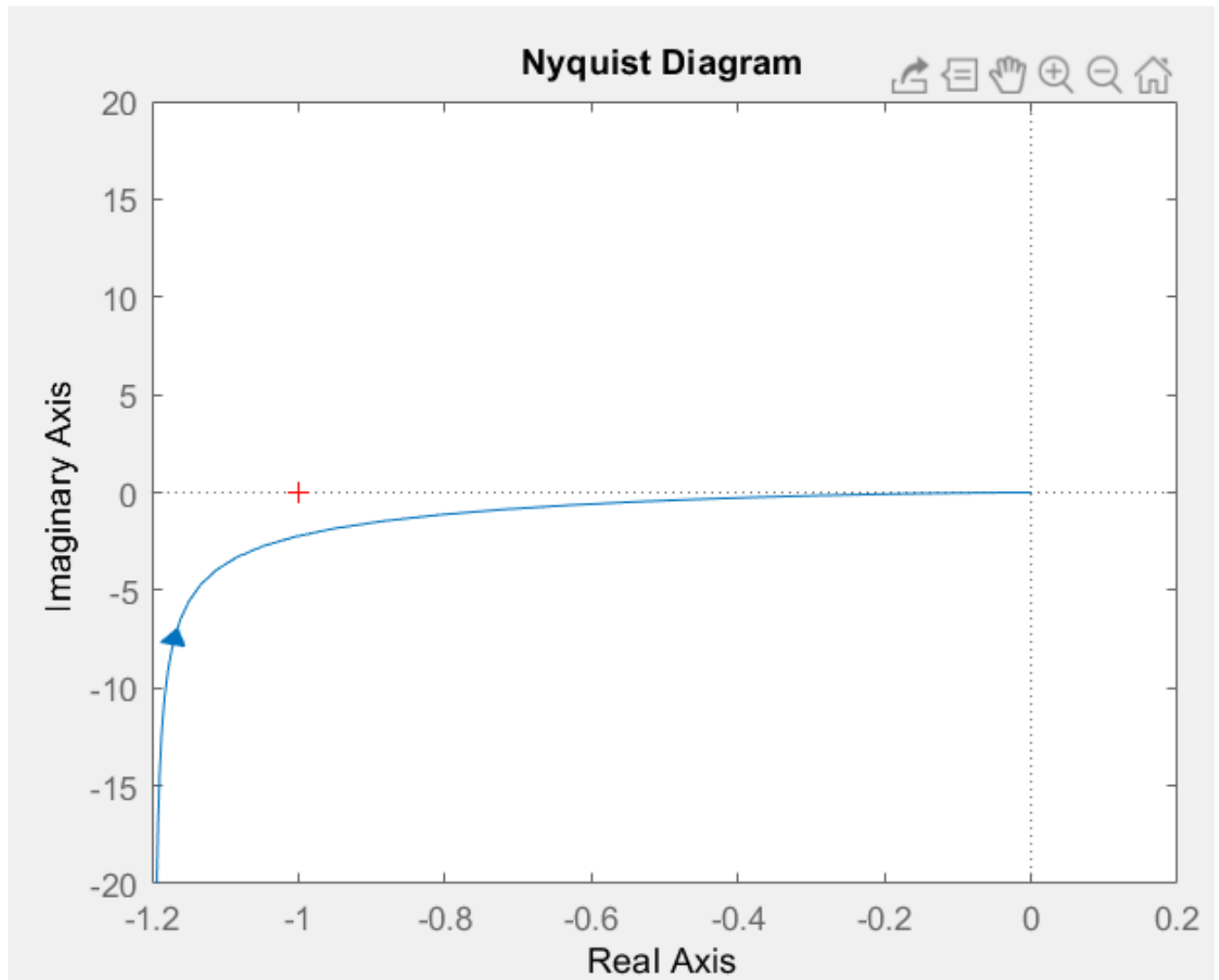


Рисунок 4.1 – Амплітудно-фазочастотна характеристика

Кількість полюсів l що лежать поза колом одиничного радіуса дорівнює нулю $l = 0$, це видно на рисунку 4.1, $z_1 = -0,983547$ та $z_2 = -0,0098816$ знаходяться в колі. Система є стійкою оскільки АФЧХ розімкнутої системи охоплює точку $(-1; j0)$ $0,2 = 0$ разів, це означає, що не охоплює вказану точку у вигляді хрестика на графіку.

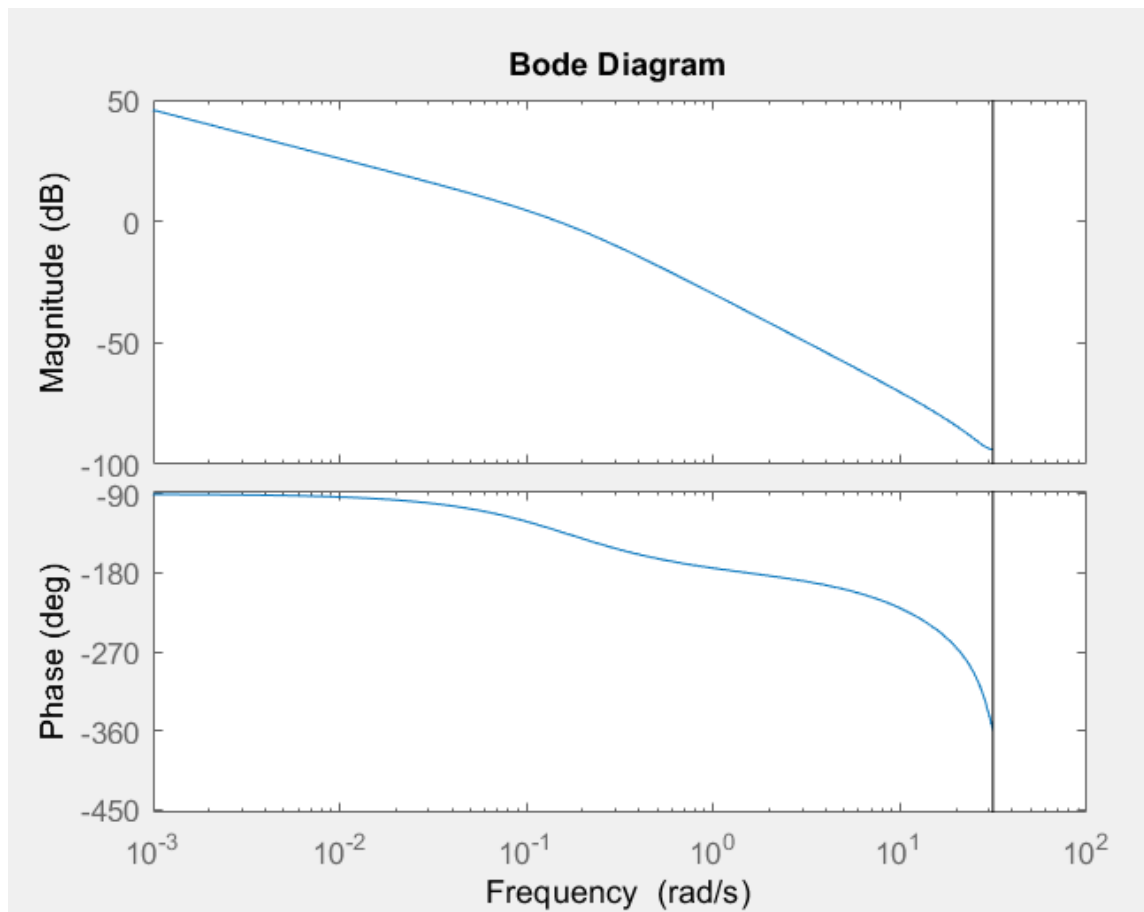


Рисунок 4.2 – Логарифмічна амплітудна характеристика та логарифмічна частотна характеристика

4.4 Аналіз якості цифрової системи

Поведінка в часі цифрової системи управління під час аналізу безперервних систем характеризується перерегулюванням, часом встановлення та часом регулювання. Точність цифрової системи у сталому режимі визначається, використовуючи теорему про кінцеве значення функції.

Від обраного періоду квантування залежить якість цифрових систем, але збільшення періоду може призвести до нестійкості системи.

Для аналізу якості візьмемо передавальну функцію приведеної безперервної частини:

$$W_{\text{пбч}}(z) = \frac{0,0001102z^2 + 0,0002413z + 0,000126}{z^3 - 1,993428z^2 + 1,003147z - 0,009719} =$$

$$= \frac{0,0001102z^2 + 0,0002413z + 0,000126}{(z - 1)(z^2 - 0,993428z + 0,009719)}.$$

Змоделюємо дану передавальну функцію у Matlab/Simulink як видно на рисунку 4.3.

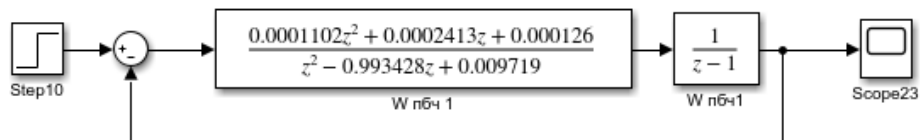


Рисунок 4.3 – Змодельована передавальна функція $W_{пбч}$

Графік перехідної характеристики цифрової системи можна спостерігати на рисунку 4.4.

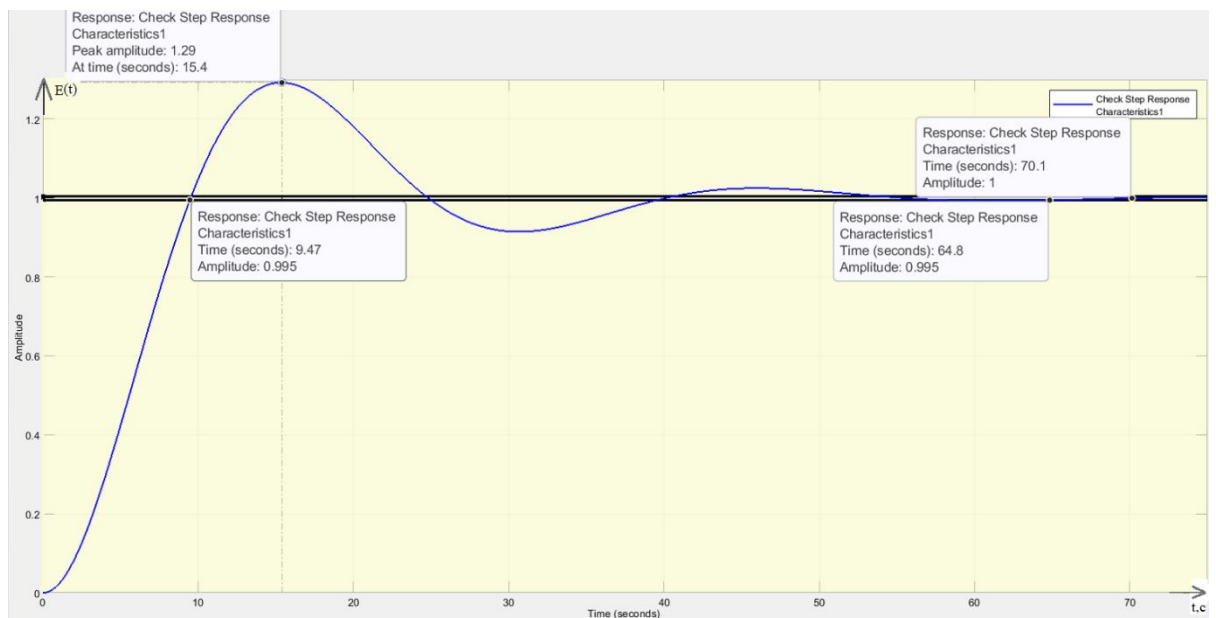


Рисунок 4.4 – Графік перехідної характеристики цифрової системи

Показники якості перехідного процесу наступні: $h_{max}=1.29$, $t_{nn}=64,8c$, $h_{cm}=1$, $t_{ycm}=9,47c$.

Порахуємо похибку $E(z)$ передавальної функції замкнутої системи:

$$\begin{aligned}
E(z) &= \frac{z}{z-1} \left(1 - \frac{0,0001102z^2 + 0,0002413z + 0,000126}{z^3 - 1,9933178z^2 + 1,0033883z - 0,009593} \right) = \\
&= \frac{z}{z-1} * \frac{z^3 - 1,9933178z^2 + 1,0033883z - 0,009593 - 0,0001102z^2 - 0,0002413z - 0,000126}{z^3 - 1,9933178z^2 + 1,0033883z - 0,009593} = \\
&= \frac{z^3 - 1,993428z^2 + 1,003147z - 0,009719}{z^3 - 1,9933178z^2 + 1,0033883z - 0,009593} * \frac{z}{z-1}.
\end{aligned}$$

Знайдемо ліміт $E(z)$ тобто сталу похибку ε системи за формулою:

$$\varepsilon = \lim_{z \rightarrow 1} E(z) * (z - 1). \quad (4.8)$$

Підставимо свою $E(z)$ передавальної функції замкнутої системи і порахуємо сталу похибку ε :

$$\begin{aligned}
\varepsilon &= \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z^3 - 1,993428z^2 + 1,003147z - 0,009719}{z^3 - 1,9933178z^2 + 1,0033883z - 0,009593} * \frac{z(z-1)}{(z-1)} = \\
&= \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z^4 - 1,993428z^3 + 1,003147z^2 - 0,009719z}{z^3 - 1,9933178z^2 + 1,0033883z - 0,009593}.
\end{aligned}$$

Розкриємо ліміт функції:

$$\begin{aligned}
\varepsilon &= \frac{1^4 - 1,993428 * 1^3 + 1,003147 * 1^2 - 0,009719 * 1}{1^3 - 1,9933178 * 1^2 + 1,0033883 * 1 - 0,009593} = \\
&= \frac{1 - 1,993428 + 1,003147 - 0,009719}{1 - 1,9933178 + 1,0033883 - 0,009593} = \frac{0}{0,0004775} = 0.
\end{aligned}$$

Стала похибка $e = 0$, тому похибки дана система немає. Тому як можна помітити дані на графіку на рисунку 4.4 та розрахунках збігаються.

5 СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОМИСЛОВИМ РОБОТОМ

5.1 Синтез цифрового ПД – регулятора

Перехідний процес цифрової системи керування промисловим роботом має астатизм першого порядку, тому у цифровій формі після z-перетворення, щоб коректним чином відображався графік у Matlab/Simulink, спеціально виділяємо інтегруючу ланку першого порядку. Через це було прийнято рішення розробляти пропорційно-диференційний (ПД) регулятор, так як інтегруюча ланка вже присутня і ще одна додатково з'єднана інтегруюча ланка може привести перехідний процес у нестабільний стан [13].

У цифрових системах, як і в безперервних системах використовуються цифрові ПД регулятори. На рисунку 5.1 продемонстрована структурна схема цифрового ПД регулятора.

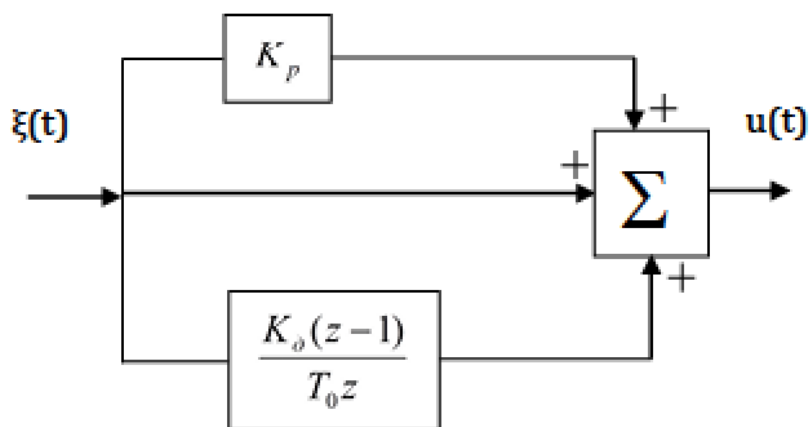


Рисунок 5.1 – Структурна схема цифрового ПД-регулятора

За структурною схемою цифрового регулятора така передавальна функція:

$$W_{\text{пд}}(z) = K_p + \frac{K_d(z-1)}{T_0 z} = \frac{K_p T_0 z + K_d(z-1)}{T_0 z}. \quad (5.1)$$

Де T_0 – період квантування,

K_p та K_d – параметри пропорційної й диференціальної складових регулювання.

Передавальна функція розімкнутої системи з цифровим ПД-регулятором виглядатиме так:

$$W_{ск}(z) = W_{пд}(z) * W_{пбч}(z) = K_p + \frac{K_d(z-1)}{T_0 z} = \frac{K_p T_0 z + K_d(z-1)}{T_0 z} * W_{пбч}(z). \quad (5.2)$$

Необхідно визначити параметри K_p та K_d для того щоб синтезувати цифровий ПД-регулятор. Щоб їх знайти потрібно визначити граничний коефіцієнт $K_{гр}$, коефіцієнт, при якому система знаходиться на границі стійкості. Для знаходження граничного коефіцієнта скористаємося кінцевим рівнянням з розділу 4.2 критерія Гурвіца. Було знайдено таке рівняння:

$$4,0062991w^3 + 3,9611505w^2 + 0,0320729w + 0,0004775 = 0.$$

Щоб визначити $K_{гр}$ потрібно його додати до рівняння вище:

$$D(w) = 4,0062991w^3 + 3,9611505w^2 + 0,0320729w + 0,0004775 + K_{гр} = 0.$$

Скористаємося формулою

$$a_1 * a_2 - a_0 * a_3 = 0 \quad (5.3)$$

для подальшого розв'язання:

$$3,9611505 * 0,0320729 - 4,0062991 * 0,0004775 - 4,0062991 * K_{гр} = 0.$$

Приведемо рівняння:

$$0,12704558 - 0,0019130078 - 4,0062991 * K_{гр} = 0.$$

					ІА62.210БАК.005 ПЗ	48
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Виносимо $K_{гр}$ за знак дорівнює:

$$K_{гр} = \frac{0,12704558 - 0,0019130078}{4,0062991},$$

$$K_{гр} = \frac{0,1251325722}{4,0062991},$$

$$K_{гр} = 0,031233956596.$$

Для визначення K_p скористаємося такою формулою:

$$K_p = \frac{K_{гр}}{a_0}. \quad (5.4)$$

Запишемо таке характеристичне рівняння, для визначення a_0 , як чисельник цифрової передавальної функції:

$$D(z) = 0,0001102z^2 + 0,0002413z + 0,000126.$$

Тепер візьмемо звідси візьмемо $a_0 = 0,0001102$ та запишемо у формулу відомі змінні для знаходження K_p :

$$K_p = \frac{0,031233956596}{0,0001102},$$

$$K_p = 283,429733176.$$

Для знаходження K_d скористаємося такою формулою:

$$\frac{K_d}{T_0 * K_p + K_d} = C. \quad (5.5)$$

Де C являється одним полюсом диференційного рівняння.

					ІА62.210БАК.005 ПЗ	49
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Поліус диференційного рівняння – це корінь характеристичного рівняння, який прирівнюється до нуля знаменником передаточної функції розімкненої системи.

Знайдемо значення поліусів системи. Для цього розкладемо квадратку частину знаменника $W_{пбч}(z)$ на дві дужки, які можна було помітити при розв'язку $W_{пбч}(z)$ у розділі 3.3 Z-перетворення:

$$W_{пбч}(z) = \frac{0,0001102z^2 + 0,0002413z + 0,000126}{(z - 1)(z^2 - 0,993428z + 0,009719)} =$$

$$= \frac{0,0001102z^2 + 0,0002413z + 0,000126}{(z - 1)(z - 0,9835465124)(z - 0,009881587566)}$$

Передаточна функція керування промислового робота має два поліуси. Для знаходження значення поліусів у знаменнику розкладені дужки квадратного рівняння прирівнюємо до нуля:

$$(z - 0,9835465124) = 0,$$

$$(z - 0,009881587566) = 0.$$

Знаходимо C_1 та C_2 :

$$C_1 = 0,9835465124,$$

$$C_2 = 0,009881587566.$$

Тепер знайдемо $K_{д1}$ для першого поліуса, підставивши всі значення у формулу:

$$\frac{K_{д1}}{0,1 * 283,429733176 + K_{д1}} = 0,9835465124.$$

Позбудемося знаменника шляхом домноження двох частин рівняння на $(0,1 * 283,429733176 + K_{д1})$, тоді:

$$K_{д1} = 0,9835465124 * (28,3429733176 + K_{д1}).$$

Розкриємо дужки:

$$K_{д1} = 0,9835465124 * 28,3429733176 + 0,9835465124 * K_{д1},$$

$$K_{д1} = 27,876629 + 0,9835465124 * K_{д1}.$$

Винесемо всі $K_{д1}$ на одну сторону:

$$K_{д1} - 0,9835465124 * K_{д1} = 27,876629,$$

$$0,016454 * K_{д1} = 27,876629.$$

Знайдемо $K_{д1}$:

$$K_{д1} = \frac{27,876629}{0,016454} = 1694,21596.$$

Таку саму послідовність рішення виконаємо для знаходження другого полюсу $K_{д2}$, підставивши другий полюс у формулу:

$$\frac{K_{д2}}{0,1 * 283,429733176 + K_{д2}} = 0,009881587566.$$

Позбудемося знаменника у дробовій частині, тоді:

$$K_{д2} = 0,009881587566 * (28,3429733176 + K_{д2}).$$

					ІА62.210БАК.005 ПЗ	51
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Розкриємо дужки:

$$K_{д2} = 0,009881587566 * 28,3429733176 + 0,009881587566 * K_{д2},$$

$$K_{д2} = 0,28007357 + 0,009881587566 * K_{д2}.$$

Винесемо всі $K_{д}$ до однієї сторони:

$$K_{д1} - 0,009881587566 * K_{д1} = 0,28007357,$$

$$0,9901184 * K_{д1} = 0,28007357.$$

Знайдемо $K_{д1}$:

$$K_{д1} = \frac{0,28007357}{0,9901184} = 0,2828687656.$$

Маючи всі коефіцієнти змодельюємо два регулятори для двох полюсів у середовищі Matlab/Simulink, (Рисунки 5.2-5.3).

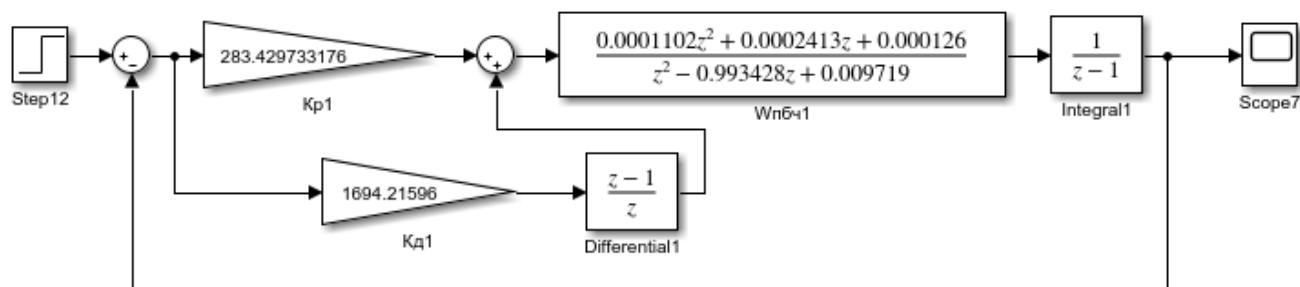


Рисунок 5.2 – Схема цифрового ПД-регулятора для першого полюсу з передаточною функцією

Тепер можемо спостерігати результат регулювання змодельованих систем на рисунках 5.4 та 5.5.

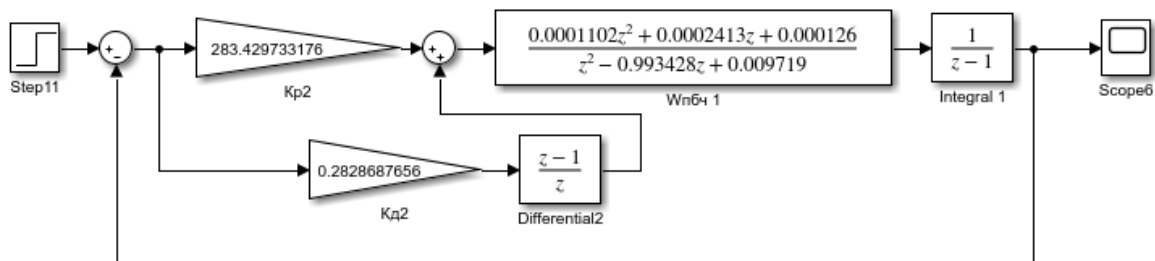


Рисунок 5.3— Схема цифрового ПД-регулятора для другого полюсу з передаточною функцією

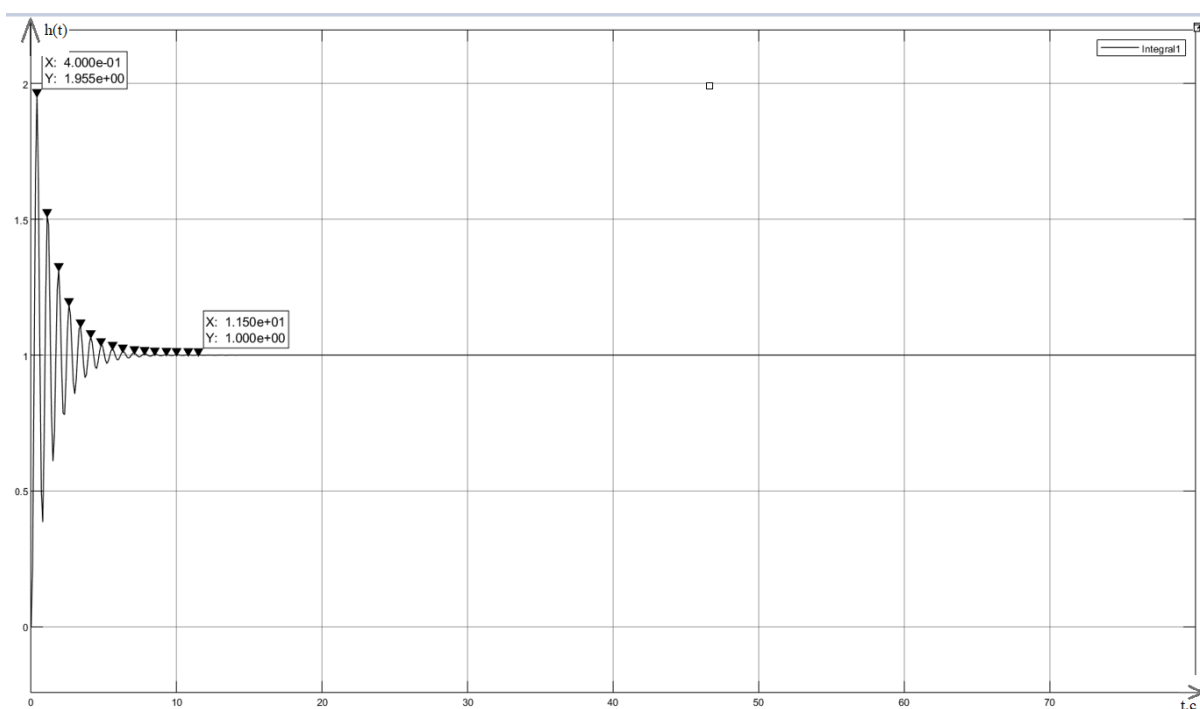


Рисунок 5.4 – Графік перехідного процесу з цифровим ПД-регулятором для першого полюсу

Як видно на графіках цих двох регуляторів, цифровий ПД-регулятор для першого полюсу має дуже велике перерегулювання 1,955, яке більше за 10%, тобто $1,955 > 1,1$, час перехідного процесу складає 7,9 секунди, що менше у 6 разів від оригіналу. Даний регулятор не повністю відповідає нормам регулювання [11]. Проаналізуємо другий регулятор. Відразу можна побачити по графіку, що даний регулятор вийшов нестійким, його неможна використовувати у подальшій розробці регулятора.

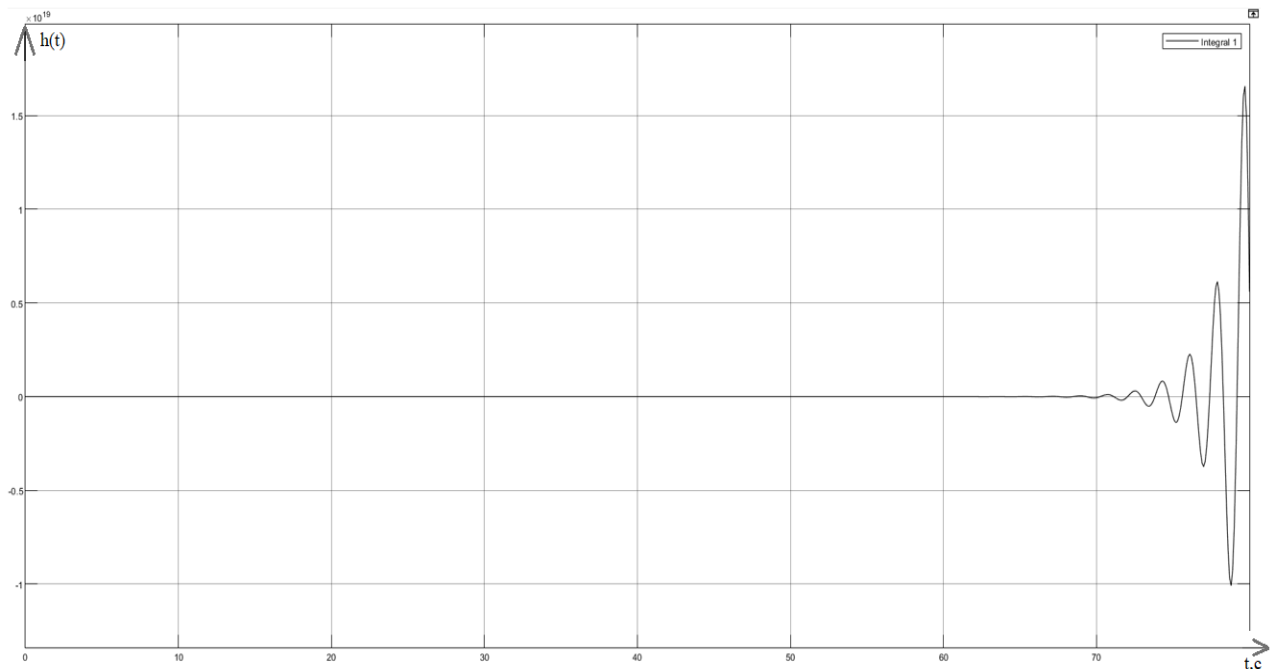


Рисунок 5.5 – Графік перехідного процесу з цифровим ПД-регулятором для другого полюсу

Як видно на графіках цих двох регуляторів, цифровий ПД-регулятор для першого полюсу має дуже велике перерегулювання 1,955, яке більше за 10%, тобто $1,955 > 1,1$, час перехідного процесу складає 7,9 секунди, що менше у 6 разів від оригіналу. Даний регулятор не повністю відповідає нормам регулювання [11]. Проаналізуємо другий регулятор. Відразу можна побачити по графіку, що даний регулятор вийшов нестійким, його неможна використовувати у подальшій розробці регулятора.

Для порівняння результатів графіків передавальних функцій з цифровим ПД-регулятором для першого полюсу та без регулятора потрібно спочатку змодельюємо системи з одним вхідним сигналом та одним елементом для спостереження за графіками перехідних процесів $W_{пбч}(z)$ та $W_{пд}(z) * W_{пбч}(z)$ на рисунку 5.6.

Тепер можемо порівняти результати графіків передавальних функцій з цифровим ПД-регулятором для першого полюсу та без регулятора на одному графіку, щоб побачити роботу цифрового ПД-регулятора (рисунок 5.7).

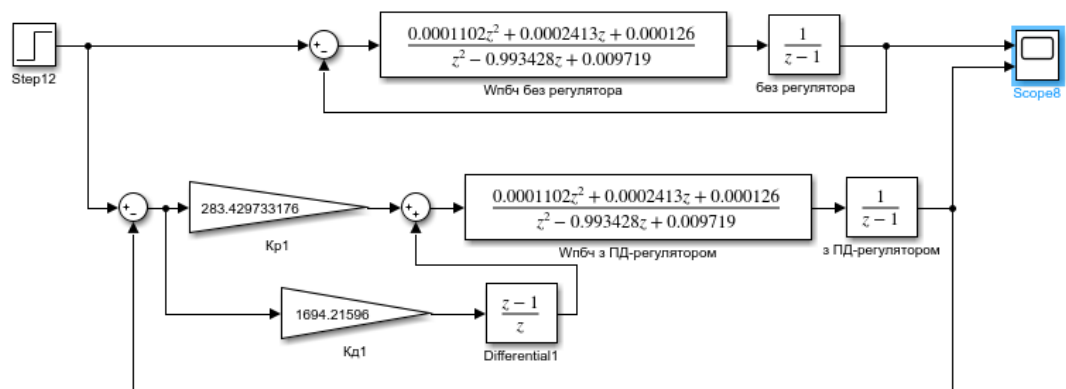


Рисунок 5.6 – Модель двох систем перехідного процесу з цифровим ПД-регулятором для першого полюсу та без регулятора.

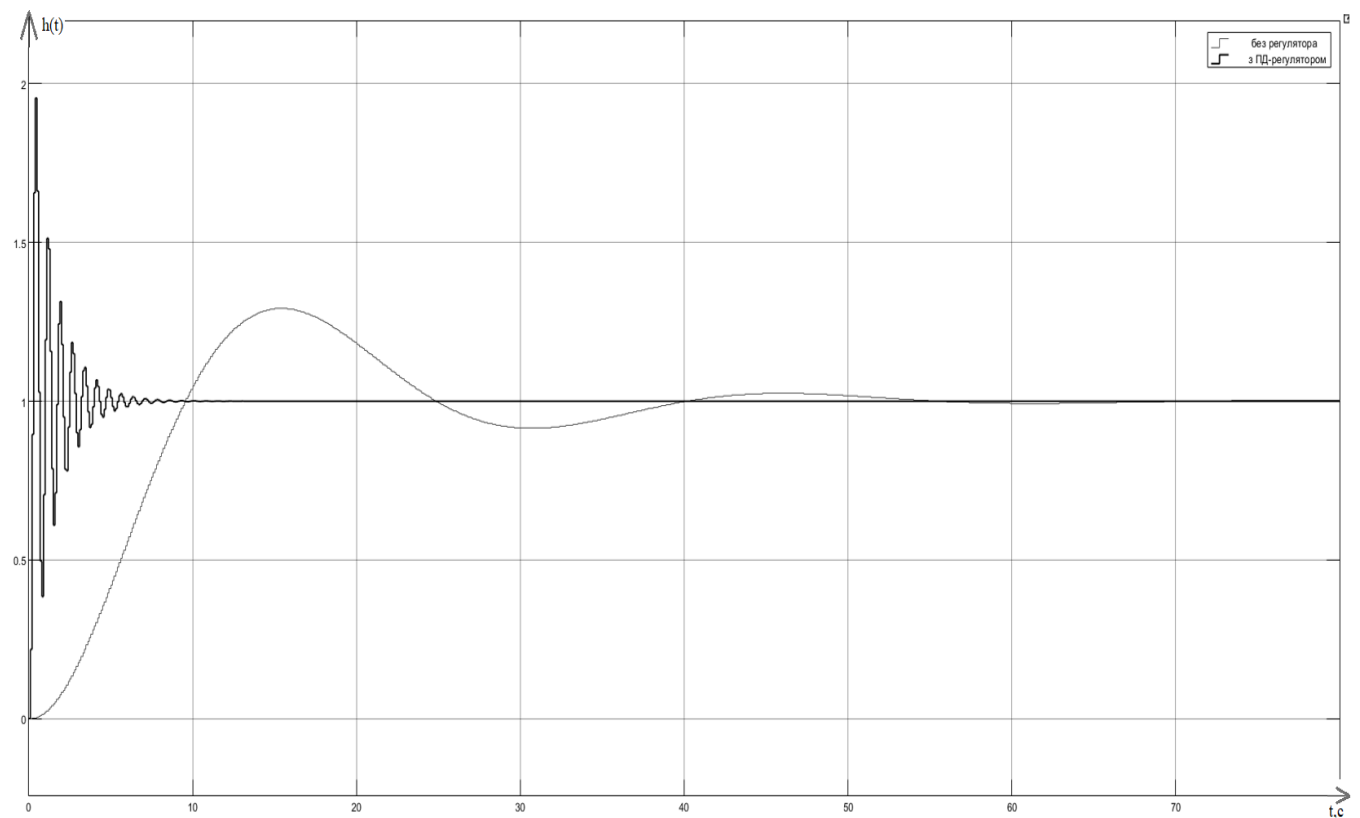


Рисунок 5.7 – Графік перехідних процесів з цифровим ПД-регулятором для першого полюсу та без регулятора

5.2 Синтез цифрового ПД – регулятора у середовищі Matlab

Завдяки додатку Matlab з його можливостями методів моделювання та розрахунків складних систем можна знаходити майже ідеальні рішення різних

задач и проблем будь-якого рівня складності. Все залежить тільки від вибору розробником методів моделювання системи або розв'язання поставленої задачі.

Спочатку запишемо змінні у робочу область Matlab (рисунок 5.8).

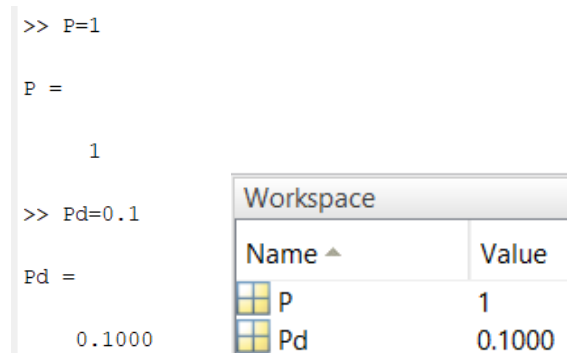


Рисунок 5.8 – Змінні для цифрового ПД-регулятора

Підставимо ці змінні в систему перехідного процесу з цифровим ПД-регулятором, та Додамо спеціальний блок автоматичної оптимізації Check Step Response Characteristics, завдяки якому можна регулювати змінні. На рисунку 5.9 можна спостерігати як виглядає змодельована система.

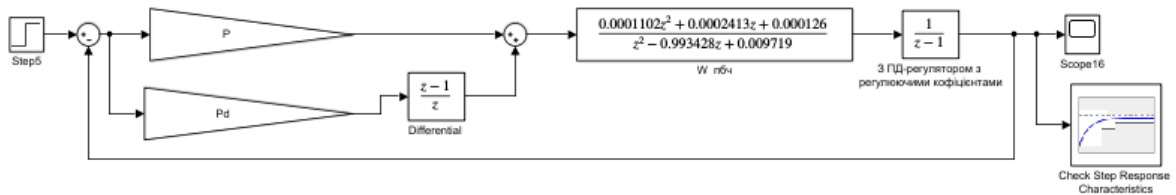


Рисунок 5.9 – Змодельована схема системи з цифровим ПД-регулятором та блоком автоматичної оптимізації Check Step Response Characteristics

Check Step Response Characteristics – це блок, завдяки якому можна коректувати вибрані коефіцієнти за встановленими границями, якщо результат задовольняє оцінками кроку відгуку при моделюванні, то всі межі виконані, блок нічого не робить. Якщо межа не задоволена, блок підтверджується, і з'являється попередження. Також можна побудувати границю на графіку часу, щоб графічно переконатися, що сигнал задовольняє обмеженням. Цей блок і інші блоки в бібліотеці верифікації моделей перевіряють, чи залишається сигнал в зазначених

межах характеристик в тимчасовій області. Параметри коефіцієнтів налаштовуються у кроковому режимі після вибору методу оптимізації та кількості повторень для оптимізації після натискання на кнопку оптимізації.

Щоб виконати оптимізацію було виставлено такі параметри оптимізації (рисунок 5.10).

Рисунок 5.10 – Виставлені параметри границь для блоку автоматичної оптимізації Check Step Response Characteristics

Після натискання на кнопку «Response Optimization...» з’являється таке вікно, у якому можна вибрати змінні (рисунок 5.11), які потрібно підібрати, та вибір методу оптимізації, як видно на рисунку 5.12, у спеціальному вікні після натискання на кнопку «Options/Optimization Options».

Рисунок 5.11 – Вигляд вікна блоку Check Step Response Characteristics з вибором змінних

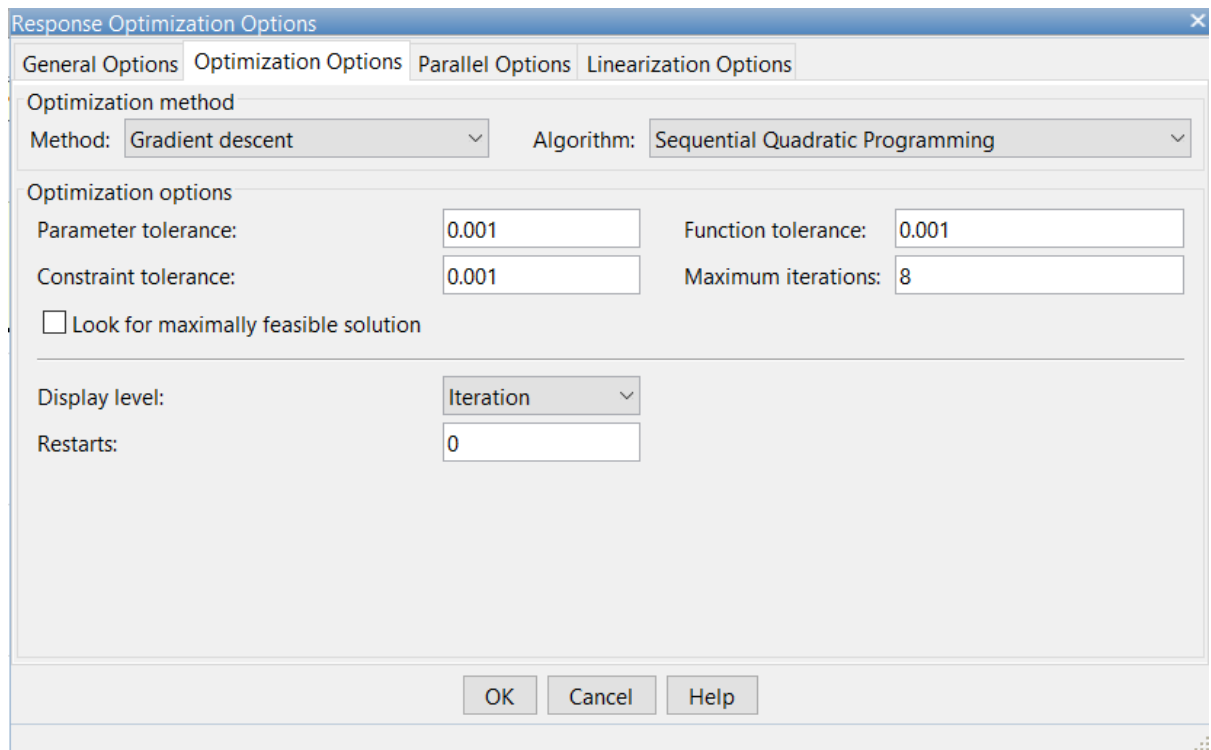


Рисунок 5.12 – Вигляд вікна Optimization Options та вибір методу оптимізації й кількості раз оптимізації

Для оптимізації коефіцієнтів було обрано метод градієнтного спуску алгоритм послідовного квадратичного програмування.

Алгоритм послідовного квадратичного програмування використовує такі формули квадратичного програмування:

$$\min_{d \in \mathbb{R}^n} \frac{1}{2} d^T H_k d + \nabla f(x_k)^T d, \quad (5.6)$$

$$\nabla g_i(x_k)^T d + g_i(x_k) = 0, i = 1, \dots, m_e, \quad (5.7)$$

$$\nabla g_i(x_k)^T d + g_i(x_k) \leq 0, i = m_e + 1, \dots, m. \quad (5.8)$$

Ці процедури більш ефективні як у використанні пам'яті, так і в швидкості, ніж процедури активного набору.

Цей алгоритм виконує кожен ітераційний крок в області меж. Самі границі не строги, тому точка може бути на межі.

Після оптимізації на графіку у вікні блоку Check Step Response Characteristics можна спостерігати такий графік, який продемонстровано на рисунку 5.13, на якому видно такі показники якості системи, як час перерегулювання 0%, помилка 0%, час встановлення 2,901 секунди, час перехідного процесу 2,901 секунди, і на рисунку 5.14 можна побачити нові коефіцієнти змінних P і Pd.

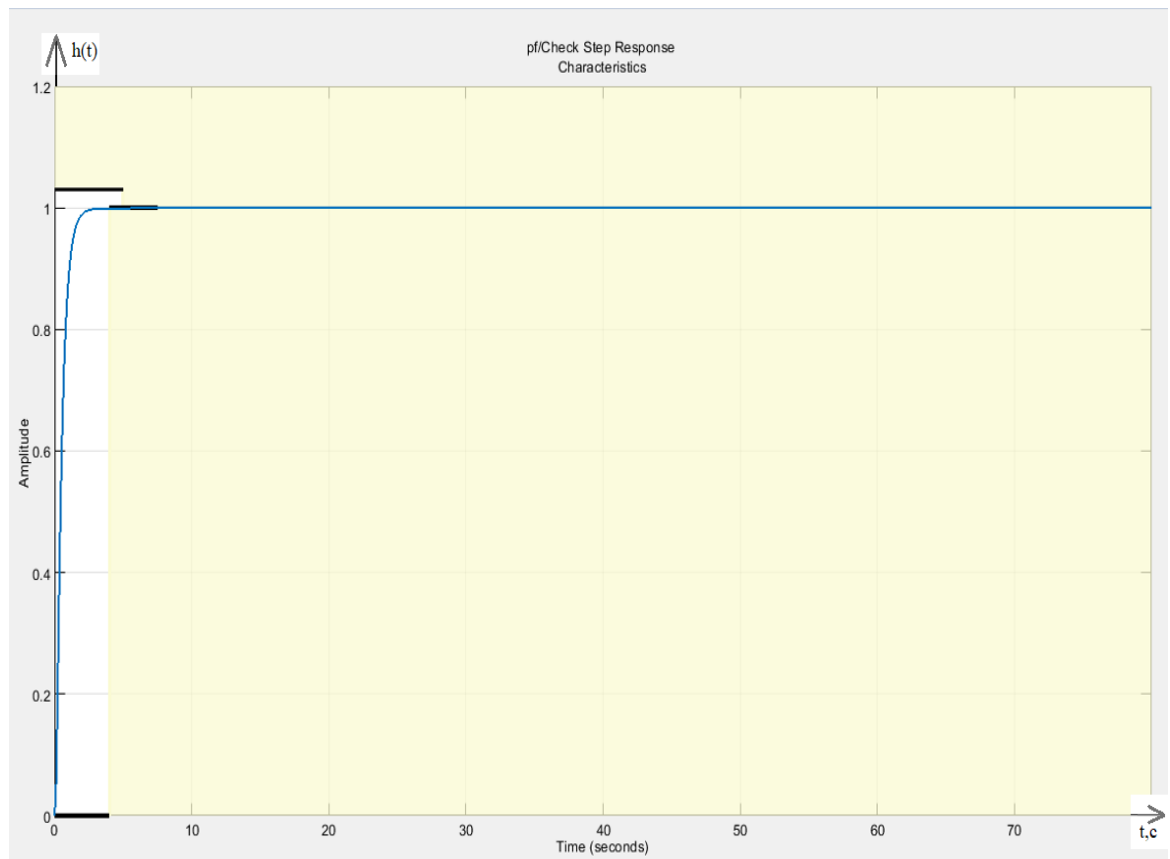


Рисунок 5.13 – Графік системи після оптимізації параметрів коефіцієнтів

Workspace	
Name ▲	Value
P	4.4460
Pd	272.9068

Рисунок 5.14 – Нові значення параметрів коефіцієнтів після оптимізації

Порівняємо графіки перехідних процесів всіх отриманих регуляторів з початковою передаточною функцією на рисунку 5.15.

Після отримання результатів порівняння графіків систем без регулятора та з регуляторами, можна сказати, що ПД-регулятор з коефіцієнтами, які були пораховані програмним додатком Matlab, показав найкращі показники перехідного процесу:

- час перехідного процесу складає 2,901 секунди;
- перерегулювання перехідного процесу по результату регулятора склало 0 секунд;
- було отримано 0% помилку перехідного процесу.

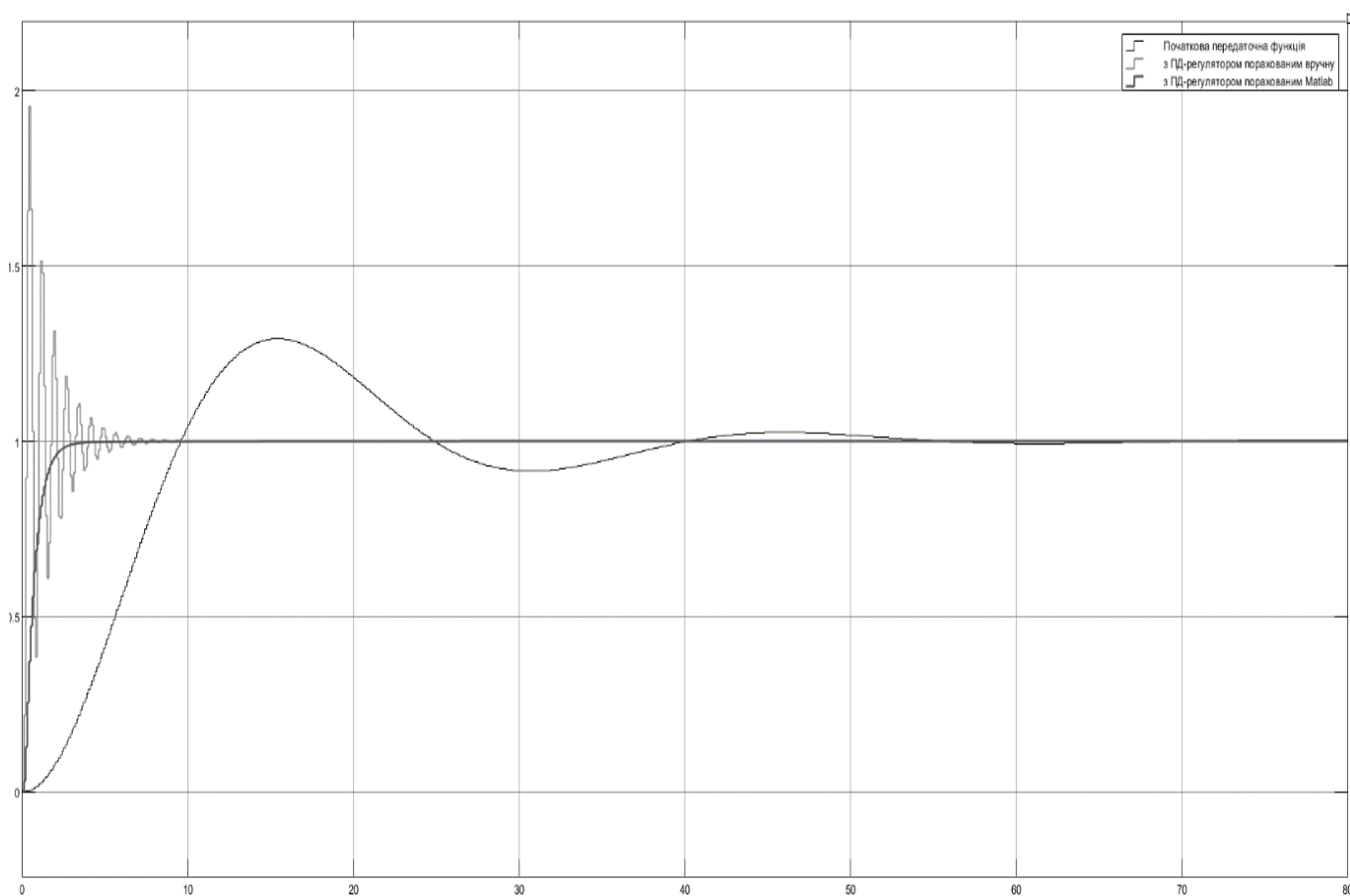


Рисунок 5.15 – Графік трьох перехідних процесів, без регулятора, з ПД-регулятором порахованим вручну та ПД-регулятором порахованим Matlab

6 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА

6.1 Безпосередня декомпозиція регулятора

Застосування цифрових регуляторів є найбільш універсальним способом корекції цифрових систем. Імпульсні фільтри або контролери на мікропроцесорах або програми ЕОМ можуть виконувати функцію цифрового регулятора [9].

Передавальна функція цифрового регулятора має такий загальний вигляд:

$$D(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}}{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}} = \frac{E_2(z)}{E_1(z)}. \quad (6.1)$$

Представимо цю функцію в наступному вигляді:

$$E_2(z) = (b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}) * A(z), \quad (6.2)$$

$$A(z) = \frac{1}{a_0} * E_1 - \frac{1}{a_0} * (a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}) * A(z). \quad (6.3)$$

Де z^{-1} – це затримка розміром один такт, а $A(z)$ – фіктивна змінна. Ланкою затримки виконується реалізація для цієї функції операції накопичення даних.

Для безпосередньої декомпозиції було взято передавальну функцію цифрового ПД-регулятора, коефіцієнти якого порашовані завдяки додатку Matlab:

$$\begin{aligned} W_{\text{пд}}(z) &= 4,4460199 + \frac{272,906764 * (z - 1)}{z} = \\ &= \frac{4,4460199z + 272,906764z - 272,90676}{z} = \frac{277,3527839z - 272,906764}{z}, \\ W_{\text{пд}}(z) &= \frac{277,3527839 - 272,906764z^{-1}}{1} = \frac{E_2(z)}{E_1(z)}, \\ E_2(z) &= (277,3527839 - 272,906764z^{-1}) * A(z), \\ A(z) &= \frac{1}{1} * E_1(z) - \frac{1}{1} * 1 * A(z). \end{aligned}$$

Змодельюємо методом безпосередньої декомпозиції цей регулятор у середовищі Matlab/Simulink (рисунок 6.1):

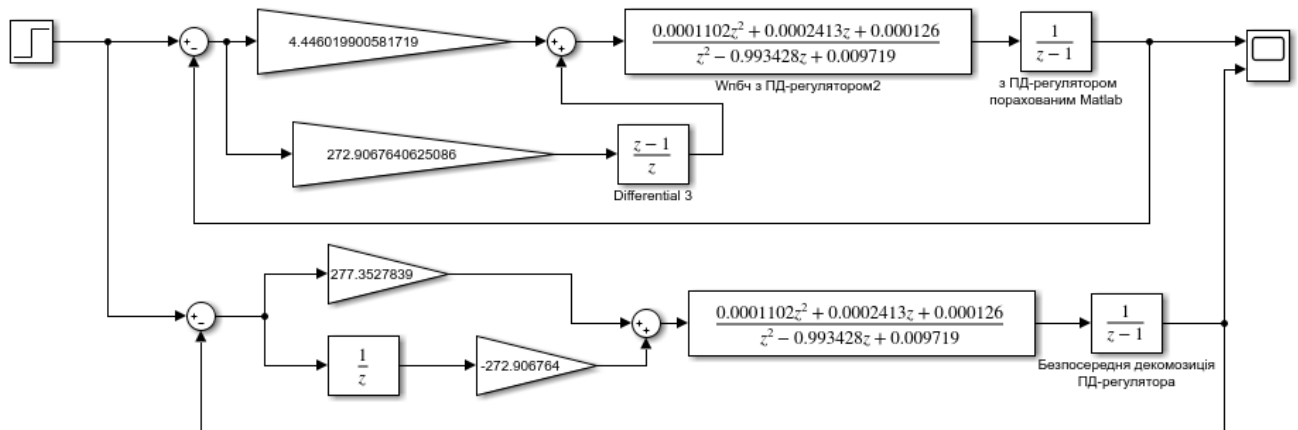


Рисунок 6.1 – Модель системи з ПД-регулятором та ПД-регулятором, який порахований методом безпосередньої декомпозиції

Порівняємо графіки цифрового ПД-регулятора та ПД-регулятора, який виконаний методом безпосередньої декомпозиції (рисунок 6.2).

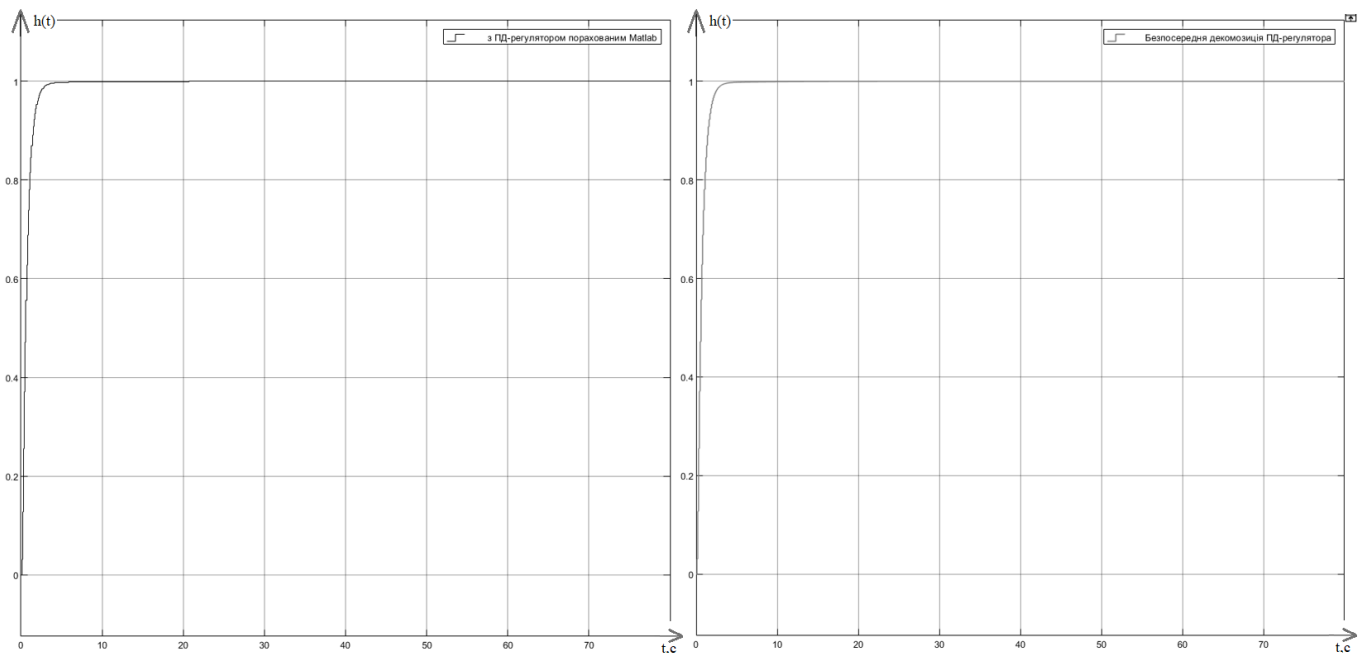


Рисунок 6.2 – Графіки перехідних процесів систем з цифровим ПД-регулятором та ПД-регулятором, який виконаний методом безпосередньої декомпозиції

На рисунку 6.2 видно, що графіки збіглися, отже безпосередня декомпозиція зроблена якісно.

6.2 Розробка ПД-регулятора мовою програмування ST

Для реалізації системи з регулятором будь-якою мовою програмування потрібно зробити безпосередню декомпозицію всіх цифрових передаточних функцій системи:

$$W(z) = \frac{0,0001102 + 0,0002413z^{-1} + 0,000126z^{-2}}{1 - 0,993428z^{-1} + 0,009719z^{-2}},$$

$$W_i(z) = \frac{1}{1 - z^{-1}}.$$

Тепер потрібно перетворити ці функції у функції, які можна записати мовою програмування:

$$W_{\text{пд}}(z) = \frac{277,3527839 - 272,906764z^{-1}}{1} = \frac{E_2(z)}{E_1(z)} = \frac{\text{reg_axis_y}}{\text{reg_axis_x'}}$$

$$W_{\text{пбч}}(z) = \frac{0,0001102 + 0,0002413z^{-1} + 0,000126z^{-2}}{1 - 0,993428z^{-1} + 0,009719z^{-2}} = \frac{E_2(z)}{E_1(z)} = \frac{\text{fr_axis_y}}{\text{fr_axis_x'}}$$

$$W_i(z) = \frac{1}{1 - z^{-1}} = \frac{E_2(z)}{E_1(z)} = \frac{i_axis_y}{i_axis_x'}$$

$$\text{reg_axis_y} = 277,3527839\text{reg_axis_x} - 272,906764\text{reg_axis_x} * z^{-1},$$

$$\text{fr_axis_y} = 0,993428\text{fr_axis_y} * z^{-1} - 0,009719\text{fr_axis_y} * z^{-2} +$$

$$+ 0,0001102\text{fr_axis_x} + 0,0002413\text{fr_axis_x} * z^{-1} + 0,000126\text{fr_axis_x} * z^{-2},$$

$$i_axis_y = i_axis_y * z^{-1} + i_axis_x.$$

Як було в реалізації ПД-регулятора методом безпосередньої декомпозиції, потрібна затримка на один такт z^{-1} . Для затримки були створені масиви даних для кожної частини функцій: знаменників та чисельників.

Середовище програмування було вибрано додаток CODESYS, і мова програмування ST.

ST (Structured Text) – це функціональна мова програмування, яка є високорівневою. Завдяки цієї мови можна легко реалізовувати фізичні, математичні процеси різної складності. Ця мова схожа на такі мови програмування як Basic або Pascal [10].

В мові ST є такі типи даних, як:

- цілочислені типи: SINT (char), USINT (unsigned char), INT (short int), UINT (unsigned int), DINT (long), UDINT (unsigned long), LINT (64 біт ціле), ULINT (64 біт ціле без знаку);
- дійсні типи: REAL (float), LREAL (double);
- спеціальні типи: BYTE (8 біт), WORD (16 біт), DWORD (32 біт), LWORD (64 біт).

Код програми мовою ST наведений у додатку А.

Зворотній зв'язок реалізований за принципом особливості послідовності мови. Тобто по закінченню одного циклу програма проходить послідовно по функціям від входу до виходу запрограмованої системи функцій. За один цикл в програмі розраховується точка, від 1 до 10 мкс. Тому вихід останньої функції віднімається від входу наступної за часом функції.

При запуску перехідного процесу запрограмованої системи у спеціальному об'єкті Trace можна моделювати точки результату певних функцій за встановленим часом (рисунки 6.3-6.4).

По результатам моделювання перехідного процесу у середовищі для розробки програм Codesys можна зробити такий висновок, що отримано оптимальний регулятор для цифрової системи керування промисловим роботом після декомпозиції й складання програми. Підтверджено час перехідного процесу 2,9 секунди, також перерегулювання перехідного процесу 0%, та 0% помилка перехідного процесу.

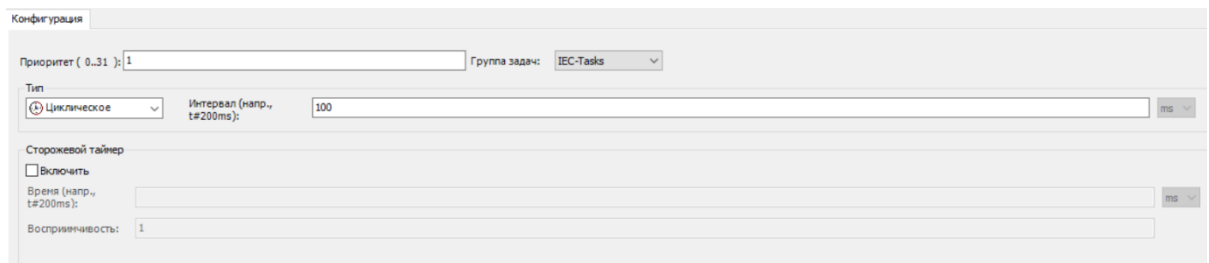


Рисунок 6.3 – Конфігурація відліку часу для одного кроку програми

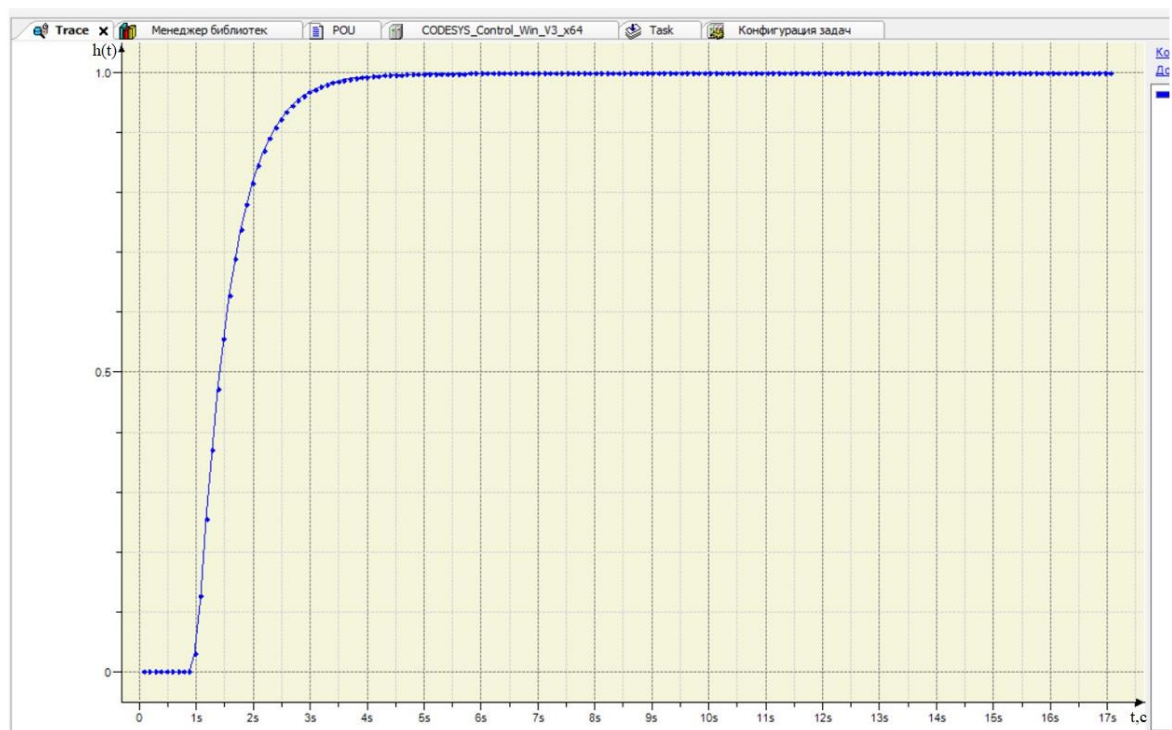


Рисунок 6.4 – Графік запрограмованої цифрової системи керування промисловим роботом з ПД-регулятором

ВИСНОВКИ

У дипломному проекті розроблена цифрова система керування промисловим роботом типу UR10, яка забезпечує підвищення ефективності технологічних операцій свердління деталей з використанням промислового робота.

У проекті розроблені структурна та функціональна схеми. Розроблена математична модель цифрової системи, яка забезпечує керування кутом нахилу шарнірного механізму маніпулятора.

Для скорочення часу свердління отворів деталей синтезовано цифровий регулятор методом ПД законів регулювання та змодельовано його роботу спеціалізованим прикладним пакетом Matlab/Simulink. Цифровий регулятор забезпечує нульову помилку, нульове перерегулювання і час перехідного процесу 2,901 секунди.

Даний ПД-регулятор реалізовано у додатку Matlab/Simulink методом безпосередньої декомпозиції. Розроблена цифрова система керування промисловим роботом з регулятором у середовищі програмування CodeSys мовою ST.

					IA62.2105AK.005 ПЗ	66
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Репнікова Н.Б. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт для студентів напряму 6.050201 «Системна інженерія» Теорія цифрових систем управління / Репнікова Н.Б., Писаренко А.В. – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 67 с.

2. Szulczyński P. Parametric programming of industrial robots / Szulczyński P., Kozłowski K. – 2-nd revised and expanded – S.: Archives of Control Sciences, 2015. – No. 25. – S. 215-225 p.

3. Промислові роботи [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Режим доступу https://uk.wikipedia.org/wiki/Промышленный_робот (дата звернення 15.04.2020) – Назва з екрана

4. Z-перетворення [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Режим доступу [https://ru.bmstu.wiki/ Z-преобразование_сигналов](https://ru.bmstu.wiki/Z-преобразование_сигналов) (дата звернення 15.04.2020) – Назва з екрана

5. Universal Robots: user manual for UR10 / Universal Robots company – N. – version 3.10. : Universal Robots, 2019 . – 230 p.

6. Клавдиев А.А. Теория автоматического управления в примерах и задачах. Ч.І: учебное пособие. – СПб.: СЗТУ, 2005. – 74 с.

7. Створення робота прямого кінематичного шляху [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Режим доступу <https://asd.sutd.edu.sg/dfab/creating-a-robot-joint-path/> (дата звернення 15.04.2020) – Назва з екрана

8. Репнікова Н.Б. Теорія автоматичного керування: класика і сучасність : підруч. / Репнікова Н. Б. – К. : НТУУ "КПІ", 2011. – 327 с.

9. Локтева С.Е. Станки с программным управлением и промышленные роботы / Локтева С.Е. – М. : "Машиностроение", 1986 – 320 с.

10. Яланецький В.А., Юрчук Л.Ю. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Комп'ютерне моделювання процесів і систем» кредитного модулю №2 «Моделювання систем керування» / Яланецький В.А.– К. : НТУУ "КПІ", 2019. – с.

					IA62.210БАК.005 ПЗ	67
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

11. Варков А.А. Исследование системы управления манипуляционным промышленным роботом на базе контроллера движения. / Тютиков В.В. – И. : ИГЕУ, 2015. – 146 с.

12. Які бувають промислові роботи (6 типів) [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Режим доступу <https://www.robowizard.ru/blog/vidi-promishlennih-robotov> (дата звернення 15.04.2020) – Назва з екрана

13. Репнікова Н.Б., Федулова В.Ю., Богодьорова Т.Я. Синтез цифровых систем управлѣния з ПнД-регуляторами / Системы обработки информации – выпуск 7 (74) – Х : НТУУ «ХПІ», 2008. 112-113 с.

14. Коллекторный двигатель постоянного тока [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Режим доступу <https://engineering-solutions.ru/motorcontrol/brushdcmotor/> (дата звернення 15.04.2020) – Назва з екрана

15. Керування збудження двигунів постійного струму [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Режим доступу <https://driveka.ru/resheniya/893.html> (дата звернення 15.04.2020) – Назва з екрана

16. Тихонов Н.Н. Переферное оборудование заводов пластмасс : учебное пособие / Тихонов Н. Н., Шерышев М. А. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : Юрайт, 2018. — 292 с.

17. Егоров И.Н., Кобзев А.А., Мишулин Ю.Е., Немонтов В.А. Управление робототехническими системами с силовомоментным оцувствлением. учебное пособие / Егоров И.Н. — В. : ВГУ, 2005. — 276 с.

18. Забудский Е.И. Электрические машины. Часть 4. Коллекторные машины постоянного и переменного тока. учебное пособие / Забудский Е.И. — М. : ООО «МЕГАПОЛИС», 2020. — 295 с.

19. Cartesian Coordinate Robots [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Режим доступу <https://www.shibaura-machine.co.jp/en/product/robot/lineup/axis/> (дата звернення 15.04.2020) – Назва з екрана

20. SRBD1600 Robot [Електронний ресурс]:[Веб-сайт]. – Режим доступу <http://www.siasun.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=50&id=411> (дата звернення 15.04.2020) – Назва з екрана